

## 머드유동층의 유동학적 특성에 관한 실험적 연구 A Laboratory Study on Rheological Properties of Fluid Mud

엔딘푹\* · 정의택\*\* · 박건철\*\*\* · 황규남\*\*\*\*

Dinh Phuc Nguyen\*, Eui-Taek Jung\*\*, KunChul Park\*\*\* and Kyu-Nam Hwang\*\*\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 최신의 유동측정기를 이용하여 고령토 및 세 종류의 도자기토 시료에 대해 머드유동층의 유동학적 특성, 즉 밀도에 따른 점성 및 항복응력의 변화특성이 정량적으로 산정되었다. 본 연구에서는 또한 이러한 머드유동층의 물리화학적 기본특성들이 각 시료별로 측정되었으며, 이 기본특성들과 유동학적 특성들 사이의 상관관계가 정성적으로 분석되었다. 본 연구결과에 따르면, 머드유동층은 일반적으로 의가소성 거동특성을 보이며, 그 점성 및 항복응력은 모두 밀도가 증가함에 따라 지수함수적으로 급격히 증가하나, 각 시료별로 이 값들은 정량적으로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 머드유동층, 유동학적 특성, 물리화학적 특성, 점성, 항복응력

**Abstract :** In this study, rheological properties of kaolinite and three different porcelain fluid muds are quantitatively estimated with the latest rheometer, in which variations of their viscosities and yield stresses with their densities are estimated. This study also involves the measurements for the basic physico-chemical properties of fluid muds and the qualitative analysis of their correlation between physico-chemical and rheological properties. Experimental results of rheological tests show that fluid muds in general belong to Pseudo-plastic fluids and both viscosities and yield stresses of them increase exponentially with the increase of density while they are remarkably different in quantity depending on sediments.

**Keywords :** fluid mud, rheological property, physico-chemical property, viscosity, yield stress

### 1. 서 론

머드유동층은 고농도의 미세 퇴적토의 수층 부유체로 머드유동층의 발생은 퇴적(압밀되어 저면을 형성하기 전 단계) 혹은 저면 침식(액상화 후 연행부상 발생 전 단계)의 과도기 단계에서 일반적인 사항이라 할 수 있다. 머드유동층은 일부 지역에서 7~8 m 깊이의 두꺼운 층으로 발생하기도 하며 내륙 수로를 포함하는 많은 지역에서 적어도 얇은 층의 형태로라도 존재하는데(Haydel and McAnally, 2004), 이 층은 저서생물의 서식처 매몰, 선박 운항장애 및 부영양화 등과 밀접하게 관련되어 있어 중요 관리대상이 되고 있다. 한 예로, 미국 Savannah 항, 네덜란드 Europort 항, 미국 Atchafalaya Bar 수로에서는 항로 수심유지를 위해 가용한 준설용량이 초과될 정도로 많은 양의 머드유동층이 급격히 퇴적된 바 있으며, 미국 플로리다 St. Lucia 하구와 우리나라의 시화호에서는 유기물 함량이 높은 머드유동층의 퇴적으로 인하여 심각한 수질 악화가 발생되고 있는 것으로 알려지고 있다

(SFWMD, 2004; 국토해양부, 2008). 이러한 예들은 머드유동층에 대한 관리가 수동학적/환경공학적 측면에서 매우 중요한 인자임을 보여주는 것으로, 머드유동층의 퇴적으로 인한 항행수로의 퇴적문제 뿐만 아니라 수층 영양분 공급의 역학적 기구 및 오염물질 이송과 관련된 머드유동층의 역할에 대한 더 많은 연구가 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.

한편, 머드유동층의 유동특성은 밀도 변화에 따라 복잡한 소성유체(plastic fluid)의 거동형태를 보인다(Hamm and Migniot, 1993). 과거 실내 및 현장실험 결과에 따르면, 머드유동층은 상대적으로 낮은 농도(혹은 밀도)에서는 의가소성 유체의 거동을 보이나, 고농도에서는 빙햄 소성유체의 거동 형태를 띠게 된다(Sills and Elder, 1986). 또한 농도 이외에도 머드유동층 자체의 물리·화학적 특성 및 유체 특성에 의해 크게 영향을 받는다(Krone, 1963). 따라서, 머드유동층의 제반 이송현상을 현실에 맞게 해석하고자 할 경우에 시간 의존적이며 비뉴턴유체의 거동 형태를 보이는 머드유동층의 유동학적 특성 해석은 매우 필수적 사항이라 할 수 있다.

\* 전북대학교 토목공학과 (Dept. of Civil Eng., Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea)

\*\* 한국수자원공사 (Kwater, Incheon 404-300, Korea)

\*\*\* (주) 씨제이건설 (CJ engineering & construction, Jeonju 561-212, Korea)

\*\*\*\* 전북대학교 토목공학과 (Corresponding author : Kyu-Nam Hwang, Dept. of Civil Eng., Chonbuk National University, Jeonju 561-756. Korea, khwang@jbnu.ac.kr)

해외의 경우, 머드유동층의 물리화학적 특성 및 유동특성에 대한 많은 연구들이 수행된 바 있으나, 국내의 경우 전문인력 및 연구기반의 부족으로 인하여 이에 대한 연구가 거의 수행된 바 없는 상태이다. 이에 본 연구에서는 자연시료에 대한 유동특성 실험에 앞서 선행연구로서, 유동측정기를 이용하여 고령토 및 세 종류의 도자기토(청자토, 백자토, 옹기토)머드유동층의 유동특성 실험이 국내 최초로 수행되었으며, 밀도에 따른 점성 및 항복응력의 변화특성이 정량적으로 산정되고 각 시료별로 비교분석되었다. 또한 머드유동층의 유동특성에 영향을 미치는 머드유동층 자체의 물리화학적 기본특성들이 각 시료별로 측정되었으며, 이 기본특성들과 유동학적 특성들 사이의 상관관계가 정성적으로 분석되었다.

## 2. 머드유동층의 일반 특성

### 2.1 머드유동층의 발생 및 정의

머드유동층은 입자 혹은 플록(floc)간 거리의 근접성으로 인하여 그 침강이 상당히 간섭을 받으나, 유동성을 배제시킬 만큼 충분히 강한 입자 상호간의 결합구조를 형성하지는 못한다. 종종 lutocline과 관련 있는 머드유동층은 전형적으로 호수나 하구의 바다 근처 층에서 형성되나, 미세 퇴적토의 공급이 충분하고 작은 흐름이 충분히 지속적으로 유지된다면 어떠한 수체(water body)에서도 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 머드유동층은 저면경사를 따라 밀도류의 형태로 흘러내려가거나 해류나 파랑 운동 하에서의 단순한 흐름으로써 수평으로 흘러 갈 수도 있으며, 점토질 하천에서 고농도의 점토가 경사면을 따라 하류로 흘러내리거나, 하구 입구부의 외해로 대륙붕을 가로질러 이동되기도 한다.

일반적으로 머드유동층은 20~320 g/L의 부유사 농도값을 가지는데, 이 범위의 값들은 입자의 밀도 값으로 2.65 g/cm<sup>3</sup>을 사용할 경우, 부피밀도 1.01~1.20 g/cm<sup>3</sup>에 해당된다. 그러나 머드유동층의 정의는 연구자 및 사용목적에 따라 각기 다른 값을 갖는다. 과거 Been and Sills(1981)은 정지흐름 하에서의 침강실험으로부터 농도가 약 220 g/L를 초과할 때 보통 약한 고체 형태의 구조가 형성된다고 주장하였으며, Teeter(1992)는 준설 작업과 관련하여 머드유동층의 부유사 농도를 50~350 g/L의 값을 갖는 층으로 정의하였다.

한편, Ross et al.(1987)은 머드유동층의 일반적 정의를 좀더 세분화하여 하단 경계 부유사 농도 값으로 5~200 g/L, 상단 경계 값으로 180~480 g/L의 값을 제시한 바 있으며, 자연 상태에서 발생하는 머드유동층과 관련하여, 머드유동층 하단 경계 값으로 lutocline의 일반적 농도인 10 g/L(1.006 g/cm<sup>3</sup>)가 제시되었으며, 상단 경계 값으로는 250 g/L가 제시된 바 있다(Kirby, 1986). 그러나 이러한 값들은 해석별로 각기 다르게 정의된 것으로 선박의 운항 혹은 준설의 관리 측면 등을 고려하여 제시되어 왔으며, 그 목적에 따라 이 값들은 다

소 변화된다.

### 2.2 머드유동층의 일반 유동학적 특성

단일 광물의 부유체나 그 구성비가 알려진 혼합체 혹은 자연시료 등의 점성은 보통 유동측정기를 이용하여 전단율과 전단응력을 측정하고 그 상관관계를 해석함으로써 조사된다. 맑은 물의 경우 전단응력-전단율 곡선은 원점을 지나고 분자점성과 동일한 경사를 갖는 직선으로 나타나는데, 이러한 특성을 갖는 유체를 뉴턴유체라고 한다. 석영입자의 부유체는 전반적으로 뉴턴유체의 특성을 보이거나, 점성은 농도가 증가할수록 증가하며 전단율 0에서 유한 전단강도를 가지는 빙햄 소성 유체로 정의된다. 모래 부유체와는 달리, 점토 광물의 부유체는 농도가 약 10 g/L(1.006 g/cm<sup>3</sup>) 이상이거나 점토 광물의 비율이 대략 20%를 초과할 때는 비뉴턴유체의 반응을 보이게 되며 작은 전단율에서 전단응력은 급격히 상승하나, 그 증가율은 점차 감소하여 결국에는 직선형태가 되는데, 이러한 반응을 보이는 물질은 의가소성 유체로 정의된다. 전단율이 작을 때 점성은 커지고, 전단율이 증가할수록 감소하여 일정한 소성점성을 갖게 되는데, 이러한 부유체들은 종종 'shear thinning'이라고 불린다. 응집체의 구조적 차수 개념에 따르면, shear thinning 효과로 인하여 플록 격자망은 기본 단위체인 플록으로 점진적으로 파괴되며, 점성 변화는 전단율이 대략 200 s<sup>-1</sup>보다 작은 구간에서 대부분 발생한다. 이 구간은 하구 및 연안수역 고려시에 중요한 구간에 속하는데, 고에너지 난류의 경우를 제외하고, 바다의 수층 10 cm에 걸쳐 속도전단이 100 cm/s, 즉 전단율이 10 s<sup>-1</sup>을 초과하는 경우는 거의 없기 때문이다.

Migniot(1968)에 따르면 점토부유체는 임의의 전단율 하에서 점성이 농도의 4~5승에 비례하여 모든 농도에서 뉴턴유체의 특성을 보이는 모래 부유체와 유동학적으로 근본적인 차이가 있다. 의가소성 유체 곡선에서 균일 경사를 갖는 부분을 연장시켜 연직축과 교차하는 점에서 항복응력(yield stress)이 주어지며 이는 종종 빙햄 항복응력이라고도 불리는데, 이 항복응력은 입자간의 상호작용에 의해 비롯되는 결과이며, 입자간의 순인력의 크기와의 관계가 있다. 한편 전단율이 큰 구간에서 균일 경사로 주어지는 소성점성은 순수하게 동수 역학적 영향에 의해 비롯되며 이 두 매개변수 모두는 응집된 부유체의 특성을 나타내는데 유용하다.

## 3. 고령토 및 도자기토 머드유동층의 물리화학적 기본특성

본 연구에서는 머드유동층의 유동학적 특성을 정량적으로 산정하기 위하여 고령토 및 세 종류의 도자기토(청자토, 백자토, 옹기토)가 대표시료로 선정되어 사용되었다. 이들 시료는 입경이 매우 불균일한 일반 자연시료와는 달리 입경의 균일성이 매우 높아 기초적인 점착성 퇴적물의 특성 해석시에

일반적으로 많이 사용되며, 또한 상용화 되어있어 구입이 용이한 장점이 있으므로 본 연구에서는 고령토 및 도자기토가 대표시료로 채택되었다. 머드유동층의 유동학적 특성은 머드유동층 자체의 물리화학적 특성에 의해 크게 영향을 받으므로(Krone, 1963), 이러한 항목들에 대한 조사 및 분석은 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 고령토 및 세 종류의 도자기토의 물리화학적 특성 조사를 위한 목적으로 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성성분 및 양이온 교환율(CEC)의 4가지 항목에 대한 조사분석이 수행되었다.

**3.1 입경분포**

본 연구에서 사용된 4개의 머드유동층 시료는 각각 No. 200번 체( $\phi=75 \mu\text{m}$ )를 기준으로 wet-sieving 방법으로 분리되었으며, No. 200번 체를 통과한 시료는 한국화학시험연구원의 BECKMAN COULTER LS-230 입도분석기를 이용하여 분석되고, 체에 남은 시료에 대해서는 체분석이 수행되었다. 본 연구에서 사용된 고령토 및 세 종류의 도자기토는 모두 매우 미세한 입자들로, No. 200번 체를 거의 다 통과하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 입경분포 측정 결과는 Fig. 1 및 Table 1에 주어진다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이, 고령토 및 세 종류의 도자기토 머드유동층의 입경분포는 대체적으로 유사한 입경분포를 가지나, 백자토가 가장 세립한 분포를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 머드유동층의 평균입경은 옹기토가 가장 크며 내림차순으로 옹기토 > 청자토 > 고령토 > 백자토 순으로 나타났으며, 실트와 점토의 함량은 대체적으로 비슷한 수준인 것으로 나타났다(Table 1).

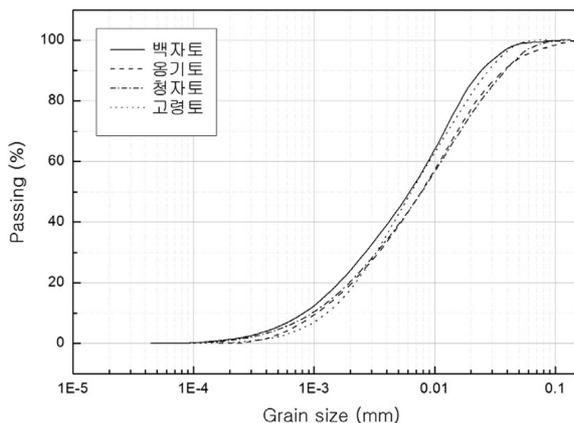


Fig. 1. Comparison of Grain Size Distribution of Fluid Muds.

Table 1. Characteristics of Grain Size of Fluid Muds

구분	평균입경 ( $\mu\text{m}$ )	Sand(%) ( $d > 62.5$ )	Silt(%) ( $62.5 < d < 4$ )	Clay(%) ( $d < 4$ )
백자토	10.16	0.76	60.05	39.19
옹기토	15.10	4.01	62.43	33.56
청자토	14.41	2.46	63.34	34.20
고령토	10.94	0.16	64.08	35.76

Table 2. Organic Contents of Fluid Muds

구분	유기물 함량(%)
청자토	5.0
백자토	5.0
옹기토	5.1
고령토	5.7

Table 3. Components of Mineral Matters of Fluid Muds

구분	광물질 구성성분
청자토	고령토(40.4%), 석영(26.8%), 회장석(25.2%), 일라이트(7.5%), 몬모릴로나이트 미량
백자토	석영(43.2%), 고령토(29.5%), 조장석(14.1%), 정장석(8.9%), 일라이트(4.2%), 몬모릴로나이트 미량
옹기토	석영(44.4%), 고령토(27.1%), 조장석(10.5%), 정장석(9.9%), 일라이트(8.1%), 몬모릴로나이트 미량

**3.2 유기물 함량**

본 연구에서 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따라 강열감량법으로 분석되었다. 고령토 및 세 종류의 도자기토 머드유동층에 대해 산정된 유기물 함량은 Table 2에 주어지는데, 각 시료의 유기물 함량은 5.0~5.7%로 그 차이가 미미한 것으로 나타났다.

**3.3 광물질 구성성분**

고령토를 제외한 도자기토 머드유동층의 광물질 구성성분은 한국지질자원연구원의 회절분석기(X'pert MPD)를 이용하여 정량적으로 수행되었으며 분석결과는 Table 3에 주어진다. 표로부터 알 수 있는 바와 같이, 백자토와 옹기토는 비교적 비슷한 구성을 갖는 것으로 나타났으나, 청자토의 광물질 구성성분은 이들과는 달리 고령토의 함유량이 더 많고 석영은 더 적은 것으로 나타났다.

**3.4 양이온 교환율(CEC)**

한 점토 시료에서 교환 가능한 전체 양이온 양은 실험을 통하여 결정될 수 있다. 이 양은 100 g의 건조 점토 시료당 밀리당량(mEq)으로 표현되며, 점토의 양이온 교환율(CEC)이라 불린다. 점토광물의 CEC는 단지 그 반응적 성질만을 반영하여 나타내는데, CEC 값의 증가는 반응이 증가함을 의미하며, 이것은 또한 점착성의 증가와 관련된다. 그러나 CEC는 무기성 및 유기성 기원의 여러 인자들에 의해 변화될 수 있기 때문에, 이러한 연관성이 반드시 비례적인 것은 아니다.

본 연구에서는 암모늄 아세테이트법을 이용하여 CEC 값이 측정되었으며, CEC 측정에 대한 자세한 사항은 문(1996)에 주어진다. 본 연구에서 측정된 고령토 및 세 종류의 도자기토에 대한 CEC 값은 Table 4에 제시된다. 표에서 알 수 있는 바와 같이, 청자토가 가장 큰 CEC 값을 가지는 반면에 고령토는 가장 작은 CEC 값을 갖는 것으로 나타났는데, 청자토의 CEC 값은 10.50 mEq/100 g으로 고령토보다 약 10.5배 크다.

**Table 4.** CEC of Fluid Muds

구분	양이온 교환율 (mEq/100g)
청자토	10.50
백자토	3.53
옹기토	7.29
고령토	1.00

**Table 5.** Experimental Conditions in Rheological Tests

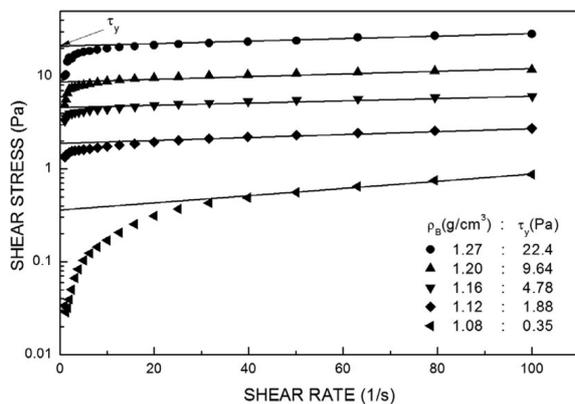
시료명	고령토	청자토	백자토	옹기토
부피밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	1.08	1.07	1.09	1.05
	1.12	1.12	1.13	1.08
	1.16	1.16	1.15	1.10
	1.20	1.21	1.20	1.14
	1.27	1.28	1.24	1.17
			1.29	1.22
전단율 (1/s)	1~100			

### 4. 유동학적 특성 실험

#### 4.1 실험방법

본 연구에서는 머드유동층의 점성 및 전단응력을 측정하기 위하여, 최신의 유동측정기인 TA Instrument사의 모델 AR 2000을 이용하여 머드유동층에 대한 유동학적 특성 실험이 수행되었다. 유동측정기는 크게 유동측정기 본체, 보조 장치인 공기압축기 및 측정 소프트웨어가 설치된 PC로 구성되어 있으며, 머드유동층 시료에 일정 범위의 전단율( $\dot{\gamma}$ )이 가해지고, 그에 따른 전단응력( $\tau$ )이 측정된다. 또한, 전단율과 전단응력 사이의 관계로부터 머드유동층 시료의 점성( $\eta$ )이 자동 산정되어 컴퓨터에 저장된다. 점성은 다음의 식(1)에 의해 계산되는데, 여기서  $\eta$ 는 점성,  $\Gamma_c$ 는 토크,  $h_s$ 는 접시와 회전판 사이의 간격,  $R_c$ 는 회전판의 반지름,  $\omega_0$ 는 회전판의 회전각속도이며,  $K$ ,  $n$ 은 식(2)에 의해 구해지는 상수값이다.

$$\eta = \frac{3\Gamma_c h_s}{2\pi R_c^4 \omega_0 \left(1 + \frac{n}{3}\right)} \tag{1}$$



**Fig. 2.** Variation of Shear Stress with Shear Rate for Kaolinite of Different Densities.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \tag{2}$$

#### 4.2 실험조건

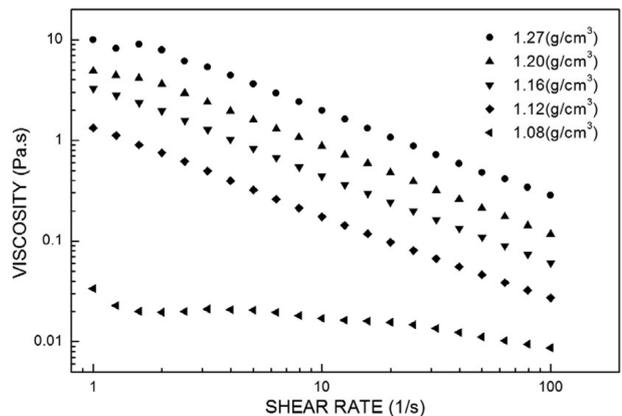
본 연구에서 유동학적 특성 실험은 머드유동층의 부피밀도를 변화시켜가며 수행되었으며, 각 시료별 실험조건은 Table 5에 주어진다. 표에 주어진 바와 같이, 실험에 사용된 4개 시료의 부피밀도는 1.05 g/cm<sup>3</sup>부터 1.29 g/cm<sup>3</sup>까지 변화하였으며, 전단율은 1~100 s<sup>-1</sup>이 적용되었다.

### 5. 유동학적 특성 실험 결과

#### 5.1 전단율에 따른 전단응력 및 점성의 변화

유동측정기를 이용한 유동실험은 밀도를 변화시키면서 고령토 및 세 종류의 도자기토 머드유동층에 대해 수행되었는데, 대표적인 예로써 고령토에 대한 결과만이 Fig. 2와 3에 주어진다. 세 종류의 도자기토에 대한 결과는 Phuc(2010)에 주어진다. Fig. 2에서는 각 밀도별로 전단율에 따른 전단응력의 변화가 주어지는데, 이들 결과는 머드유동층의 전형적인 유동 특성인 의가소성 거동특성을 잘 나타내고 있다. 즉, 작은 전단율 구간에서는 전단응력이 급격히 상승하나, 전단율이 커짐에 따라 그 증가율은 점차 감소하여 결국 직선 형태로 나타나는 거동특성을 보인다. 특히, 머드유동층의 밀도가 커질수록 의가소성 거동특성이 점점 더 명확해짐을 알 수 있다. 일반적으로 부유체의 부피밀도가 1.006 g/cm<sup>3</sup> 이상이거나 점토 광물의 비율이 대략 20%를 초과할 때 비뉴턴유체의 반응을 보이는 것으로 알려지고 있는데, 본 연구의 유동특성 실험에 사용된 4개 시료 머드유동층의 저면밀도는 1.05 g/cm<sup>3</sup> 이상이며, 점토의 비율 또한 모두 30% 이상이므로, 이들 시료의 유동특성이 의가소성 거동특성을 보이는 것은 타당한 결과라고 하겠다.

전단율에 따른 점성의 변화는 Fig. 3에 제시된다. 점성의 변화 역시 전단응력과 마찬가지로 머드유동층의 전형적인 유동 특성, 즉 전단율이 증가함에 따라 점성이 감소하는 의가소성



**Fig. 3.** Variation of Viscosity with Shear Rate for Kaolinite of Different Densities.

거동특성을 보인다. 한편, 일부 작은 전단율의 특정구간에서는 전단율이 증가함에 따라 점성이 증가하는 팽창유체(dilatant)의 거동특성을 보이는데, 이는 일부 작은 전단율 구간에서 입자간의 결합력이 약한 플록의 파괴로 인하여 비롯된 것으로 추정된다.

**5.2 밀도에 따른 머드유동층의 점성 및 항복응력의 변화**

고령토 및 세 종류의 도자기토 모든 시료에 대한 머드유동층의 부피밀도에 따른 점성과 항복응력의 변화특성에 대한 실험결과는 Fig. 4 및 Fig. 5에 주어진다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 머드유동층의 점성 및 항복응력은 부피밀도와 그 상관성이 매우 큰 것으로 나타났는데, 4개 시료 모두에서 부피밀도가 증가함에 따라 점성과 항복응력은 지수함수적으로 급격히 증가하였다. 일반적으로 부피밀도가 증가할수록 입자간의 간격이 조밀해지므로, 입자들 간의 상호작용의 증가로 인하여 그 결합력이 더 증대된다. 입자간의 결합력이 더 강하다는 것은 가해진 전단응력에 대한 저항력 즉, 점성 및 항복응력이 더 크다는 것을 의미하므로, 부피밀도가 증가함에 따라 점성과 항복응력이 증가하는 결과는 매우 타당성 있는 결과라 해석될 수 있다.

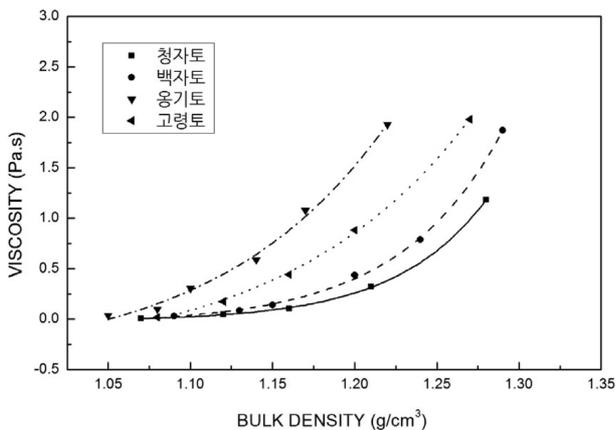


Fig. 4. Variation of Viscosity with Bulk Density for Different Fluid Muds ( $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$ ).

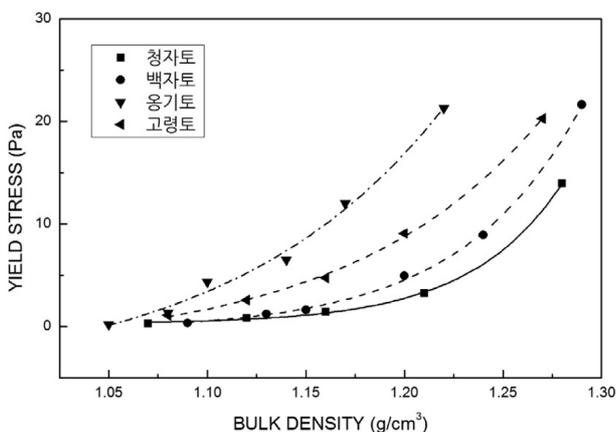


Fig. 5. Variation of Yield Stress with Bulk Density for Different Fluid Muds.

한편, Fig. 4와 5에 제시된 바와 같이, 각 시료별로 주어진 부피밀도 값에 대한 점성 및 항복응력은 정량적으로 상당히 다른 값을 갖는 것으로 나타났다. 예를 들어, 부피밀도  $1.15 \text{ g/cm}^3$ 의 조건에서 가장 큰 값을 가지는 옹기토의 점성은 약  $0.76 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 가장 작은 청자토보다 약 8.4배 큰 것으로 나타났다. 항복응력의 경우에는, 동일한 부피밀도  $1.15 \text{ g/cm}^3$ 의 조건에서 옹기토가 약  $8.63 \text{ Pa}$ 로 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 가장 작은 값을 갖는 청자토보다 약 7.7배 큰 값이다. 전체적으로, 동일밀도에 대한 머드유동층의 점성 및 항복응력의 크기는 내림차순으로 옹기토, 고령토, 백자토, 청자토의 순이며, 점성과 항복응력의 크기순서는 동일한 것으로 나타났다.

**5.3 물리화학적 특성과의 상관관계**

본 연구에서 각 시료별 유동특성 값의 정량적 차이에 대한 원인은 시료 자체의 물리화학적 특성과 연계하여 정성적으로 분석되었다. 앞서 제시된 고령토 및 세 종류의 도자기토 머드유동층 시료들의 물리화학적 특성비교는 Table 6에 요약되어 주어진다.

Table 6에서 옹기토의 평균입경은  $15.10 \mu\text{m}$ 로 가장 크고, 내림차순으로 청자토, 고령토, 백자토의 순으로 주어진다. 반면, 유기물 함량은 4개 시료 모두 10% 이하로 비슷한 수준의 소량이며, 광물질 구성성분의 경우에 백자토와 옹기토는 석영이 주된 광물이나, 청자토는 고령토가 주된 광물질 성분이다. 한편, CEC는 청자토가  $10.5 \text{ mEq}/100\text{g}$ 으로 가장 크며, 고령토가  $1.0 \text{ mEq}/100\text{g}$ 으로 가장 작다.

일반적으로 머드유동층의 평균입경이 작을수록, 그리고 유기물과 CEC 값이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있다. 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 머드유동층에 많이 함유되어 있는 고령토, Illite, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영이 훨씬 작은 점착력을 갖는다. 따라서, 점착성과의 관계가 종종 유효하지 않은 CEC의 영향을 무시할 경우에, 고령토보다 상대적으로 평균입경이 크고 유기물 함량이 적은 청자토 시료는 고령토보다 더 작은 점착력을 가질 것으로 판단된다. 앞서 설명된 바와 같이, 머드유동층 퇴적물의 점착력이 더 크다는 것은 머드유동층을 구성하고 있는 개개 토사입자의 결합력이 더 강하고, 결과적으로 흐름에 대한 저항력, 즉 점성 및 항복응력이 더 크다는 것을 의미하므로, 고령토 머드유동층이 상대적으로 작은 점착력을 갖는 청자토보다 더 작은 점성 및 항복응력 값을 갖게 되었다고 해석할 수 있다.

Table 6. Comparison of Physico-chemical Properties of Fluid Muds

Properties item	고령토	청자토	백자토	옹기토
평균입경 ( $\mu\text{m}$ )	10.94	14.41	10.16	15.10
광물질 주성분	-	Kaolinite	Quartz	Quartz
유기물함량(%)	5.7	5.0	5.0	5.1
CEC ( $\text{mEq}/100 \text{ g}$ )	1.0	10.5	3.53	7.29

한편, 다른 머드유동층의 유동특성의 차이는 앞서와 동일한 원리로 설명될 수 없는 것으로 보인다. 평균입경이 가장 크고, 비교적 점착력이 작은 석영을 주성분으로 하고 있으며, 유기물 함량도 비교적 작은 것으로 나타난 옹기토의 경우, 다른 머드유동층 시료에 비해 점착력이 작을 것으로 판단된다. 따라서, 고령토, 청자토, 백자토 머드유동층보다 옹기토의 점성 및 항복응력이 더 작아야 하나, Fig. 4와 5에 제시된 결과는 이와는 다소 다른 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 머드유동층 자체의 물리화학적 기본특성의 조사항목으로 단지 입경분포, 유기물함량, 광물질 구성성분 및 CEC의 4가지 항목만을 고려하였는데, Mehta(1986)는 이 외에도 컨시스턴시 특성, 전단특성 등을 포함한 8가지 항목을 물리화학적 기본특성 조사항목으로 제시한 바 있으며, Berlamont et al.(1993)은 생물학적 특성까지 포함된 총 28개의 항목을 필수 조사항목으로 제시하였다. 이러한 점에 비추어, 머드유동층의 유동특성의 차이는 입경분포, 유기물함량, 광물질 구성성분 및 CEC의 4가지 항목 이외의 다른 항목에 의한 영향의 결과인 것으로 추정된다.

과거 김 등(2011)은 퇴적물의 이송특성 해석을 위하여 퇴적물의 물리화학적 특성과 연계한 분석을 수행한 바 있다. 이들은 퇴적물의 물리화학적 특성만으로 침식/침강과 같은 퇴적물의 이송특성을 해석하는데 한계가 있으며, 물리화학적 특성보다는 오히려 유동학적 특성이 더 상관성을 갖는 매개변수가 될 수 있음을 제시하였다. 또한, 박(2010), 김 등(2010)은 퇴적물의 이송특성 해석시 퇴적물의 기본 유동학적 특성이 매우 중요한 매개변수임을 재차 강조하였다. 이러한 점에 비추어, 퇴적물의 이송특성 해석시에 퇴적물 자체의 기본 물리화학적 특성과 더불어 유동학적 특성과의 연계 분석을 수행하는 것이 더 의미있는 분석이 될 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 머드유동층의 유동특성, 즉 점성 및 항복응력을 정량적으로 산정하기 위하여 유동측정기를 이용한 유동특성 실험이 고령토 및 세 종류 도자기토에 대해 수행되었으며, 밀도에 따른 점성 및 항복응력의 변화특성이 정량적으로 산정되었다. 또한, 머드유동층의 유동특성에 영향을 미치는 머드유동층 자체의 물리화학적 기본특성들이 각 시료별로 측정되었으며, 이 기본특성들과 유동학적 특성들 사이의 상관관계가 정성적으로 분석되었다.

유동특성 실험결과에 따르면, 일반적으로 머드유동층은 의가소성 거동특성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 머드유동층의 점성 및 항복응력은 부피밀도와 그 상관성이 매우 큰 것으로 나타났는데, 부피밀도가 증가함에 따라 점성과 항복응력은 지수함수적으로 급격히 증가하였다. 한편, 머드유동층의 유동특성은 각 시료별로 현저한 차이를 보이는 것으로 확인되었는데, 동일 밀도에 대한 머드유동층의 점성 및 항복응력

의 크기는 내림차순으로 옹기토 > 고령토 > 백자토 > 청자토 순으로 나타났다. 머드유동층의 유동학적 특성과 물리화학적 특성간의 정성적 상관관계 분석결과에 따르면, 각 시료별 유동특성의 차이는 단지 입경분포, 유기물함량, 광물질 구성성분 및 CEC의 4가지 항목만으로는 설명될 수 없는 것으로 나타났다. 이 외의 다른 항목에 의한 영향의 결과일 것으로 추정되었다. 또한 이러한 점과 최근의 연구사례(김 등, 2011; 박, 2010; 김 등, 2010)에 비추어, 퇴적물 이송특성과 관련하여서는 퇴적물 자체의 물리화학적 특성과 더불어 유동학적 특성과 연계한 해석을 수행하는 것이 퇴적물의 이송특성과의 연관성이 더 클 것으로 추정되었다.

본 연구를 통하여 도출된 고령토 및 도자기토(청자토, 백자토, 옹기토)에 대한 점성 및 항복응력 산정결과는 향후 침강, 침식 및 연행부상 등과 같은 머드유동층의 이송특성 해석시 중요한 기초자료로 크게 활용될 수 있을 것이다. 머드유동층의 유동특성은 현장특성에 현저하게 의존하는 site-specific한 특성을 가지므로, 황 등(2005), 류 등(2006)에 의해 강조된 바와 같이 머드 유동층의 유동특성 산출을 위해서는 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 하겠다.

## 감사의 글

본 논문은 ‘인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경 예측모델링 기술개발’에 대한 연구결과의 일부로서, 국토해양부와 한국해양과학기술진흥원의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국립수산진흥원 (1997). 해양환경공정 시험방법 연구보고서. 한국해양학회.
- 국토해양부 (2008). 시화호 해양환경 개선사업. 한국해양연구원.
- 김동호, 엔딩폭, 정의택, 황규남 (2010). Fluid mud의 유동학적 특성에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, CD1, 2347-2350.
- 김만근, 양수현, 태동현, 황규남 (2011). 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 실험적 연구. 한국해양공학회지, 25(1), 14-21.
- 류홍렬, 이현승, 황규남 (2006). 금강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 침식률 매개변수의 정량적 산정. 한국해양·해양공학회지, 18(4), 283-293.
- 문희수 (1996). 점토광물학. 민음사, 509-526.
- 박용성 (2010). 점탄소성 모형을 이용한 연안하상 및 해저 점토퇴적층 거동모의. 한국수자원학회지, 43(9), 74-77.
- 황규남, 소상돈, 김태민 (2005). 미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위한 실험적 연구. 한국해양·해양공학회지, 17(2), 119-128.
- Been, K. and Sills, G. C. (1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study, Geotechnique, 31(4), 519-535.

- Berlamont, J., Ockendon, M., Toorman, E. and Winterwerp, J. (1993). The characterisation of cohesive sediment properties, *Coastal Eng.*, Vol. 21, 105-128.
- Hamm, L. and Mignoit, C. (1993). Elements of cohesive sediment deposition, consolidation and erosion, *Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*, M. B. Abbott and W. A. Price ed., E & FN Spon, London, 93-106.
- Haydel, J. F. and McAnally, W. H. (2004). Sediment resuspension by tows, *Proc. 83rd Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Kirby, R. (1986). Suspended fine cohesive sediment in the Severn Estuary and inner Bristol Channel, Rep. No. ESTU-STP-4042, Dept. of Atomic Energy, Harwell, U.K., 242.
- Krone, R. B. (1963). A study of rheologic properties of estuarial sediments, *Tech. Bull. No. 7*, Committee on Tidal Hydraulics, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Mehta, A. J. (1986). Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, 90-325.
- Migniot, P. C. (1968). Tude de proprites physiques de differents sediments tres fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, *La Houille Blanche*, Vol. 7, 591-620.
- Phuc, N. D. (2010). Investigation on rheological properties of fluid mud and bulk density measurement, Master Thesis, Chonbuk National University, Republic of Korea.
- Ross, M. A. and Lin, C. -P., Mehta, A. J. (1987). On the definition of fluid mud, *Proc. of 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*, R. M. Ragan, ed., ASCE, New York, 231-236.
- SFWMD (2004). Indian river lagoon restoration feasibility study, South Florida Water Management District, ([http://www.sfwmd.gov/org/wrp/wrp\\_ce/projects/muck.html](http://www.sfwmd.gov/org/wrp/wrp_ce/projects/muck.html)).
- Sills, G. C. and Elder, D. McG. (1986). The transition from suspension to settling bed, *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, A. J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, 192-205.
- Teeter, A. M. (1992). The viscous characteristics of channel-bottom muds, *Technical Note DRP-2-04*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

---

원고접수일: 2012년 4월 30일

수정본채택: 2012년 5월 29일

게재확정일: 2012년 6월 8일