

# 수직관내 고-액 슬러리 유동 계측 실험연구

최종수 · 홍섭 · 양찬규  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## Experimental Study of Solid-water Slurry Flow in Vertical Pipe

JONGSU CHOI, CHAN-KYU YANG, AND SUP HONG  
KRISO, KORDI, P.O.Box 23, Yusong-gu, Taejon 305-600, Korea

**KEY WORDS:** Solid-water slurry flow 고-액 슬러리 유동, Conveying system 송출시스템, Deep-sea manganese nodule miner 심해저 망간단괴 집광기, Transport concentration 이송농도, Pressure gradient 압력구배

**ABSTRACT:** In order to develop a nodule conveying system through a flexible pipe out of the deep-seabed manganese nodule miner, an experimental study of the solid-water slurry flow in vertical pipe is performed as the first stage of total experiments. Hydraulic characteristics of the pipe slurry flow such as slip velocity, transport concentration and pressure gradient are investigated for the size of particle, load ratio, and flow rate of water. The higher the load ratio is, the larger the transport concentration and pressure gradient become. The bigger the size of particles is, the larger the pressure gradient becomes. The effectiveness of the flow rate to hydraulic performance is also investigated. This results are to be used for designing crusher and pump, and operating the conveying device.

### 1. 서 론

심해저 망간단괴 채광시스템은 집광, 양광, 수상선 시스템으로 크게 분류되며 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 송출시스템(conveying system)은 채집된 단괴를 양광시스템의 버퍼까지 전달해주는 역할을 하는 것으로 고-액 슬러리 유동을 이용하는 것이 합당한 방법 중 하나로 고려된다.

단괴는 송출시스템의 파쇄기, 단괴처리덕트, 송출펌프, 유연관을 차례로 거치면서 양광관의 버퍼까지 이동된다. 그 중 단괴이송 뿐만 아니라 집광기의 자유로운 주행을 위해 양광관의 버퍼를 연결하는 유연관은 송출이송경로로서 항상 동적거동과 경로형상의 변화를 수반하므로, 유연관 내부 고-액 슬러리 유동의 유체역학적 특성을 파악하여 설계에 반영하기 위해서는 유연관부의 형상 및 거동의 정확한 모델링이 선행되어야 한다.

본 논문은 단괴 송출시스템의 설계를 위한 첫번째 단계 실험연구에 관한 것으로, 기본실험을 통해 실험시설의 신뢰성을 확인하고 파쇄기 및 송출펌프의 설계와 송출시스템 운용을 위한 기본 데이터 확보를 목적으로 하고 있다.

수직관내 고-액 슬러리 유동에 대한 실험연구는 이미 많이 수행되었다. 그 중 Newitt 외(1961)는 고-액 슬러리 유동에 대한 광범위한 실험 연구를 수행하여 유량(flow rate)과 유체구배(hydraulic gradient) 및 이송농도(transport concentration)의 관계를 규명하였다. 정진수 외(1998)는 Newitt의 논문과 비교연구를 통하여 직접적인 방법으로 압력구배(pressure gradient)를 계측하고 입자의 형상효과에 대해서도 연구를 수행하였다.

Engelmann(1978)은 수직관의 고-액 슬러리 유동에 대한 연구를 망간단괴의 양광에 응용할 목적으로 입자의 속도, 압력구

배, 이송농도가 입자의 치수 및 유량에 어떻게 영향을 받는지를 균질한(homogeneous) 입자의 치수와 비균질한(nonhomogeneous) 입자의 치수조합에 대해 구별하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 직경 50 mm의 파이프내에 비중이 2.5인 유리구슬(glass bead)을 이용하여, 입자의 크기, 부하비(load ratio), 유량이 압력구배와 이송농도에 미치는 영향에 대해 실험을 수행하였다.

### 2. 실험계획

Fig. 1은 심해저 망간단괴 집광기의 개념도를 나타낸 것으로 그림 내의 송출시스템은 채집된 망간단괴를 일정한 크기 이하로 파쇄하는 파쇄기, 유동을 발생시키는 송출펌프, 파쇄기와 송출펌프 사이를 연결하는 송출덕트, 양광관의 버퍼까지 연결된 유연관으로 구성되어 있다. 이중 단괴유동을 결정하는 가장 중요한 부분은 서론에서 설명하였듯이 유연관으로 사료되며, 현 연구에서는 추후 정확한 모델링에 의한 실험의 초기단계로 유연관을 수직관으로 모델링하여 실험을 수행한다.

송출시스템 각 부분의 사양설계와 운용을 위해서 얻어야 할 데이터는 다음과 같다.

- 파쇄기 사양 : 파쇄된 단괴의 크기
- 송출펌프 사양 : 유량과 손실수두의 범위
- 송출덕트 형상 : 막힘이 없이 통과될 수 있는 형상
- 운용을 위한 데이터 : 에너지 소비를 최소화 할 수 있고, 안전운전이 보장되는 펌프의 운전조건

본 연구에서는 송출덕트의 형상은 일정한 형태로 고정시켰으며, 수직관은 직경(D)은 50mm, 높이(L)는 약 4.5m (L/D = 90)

의 원형관으로 제작된다. 이상을 고려할 때 실험변수는 다음과 같다.

- 입자의 크기 : 3mm, 5mm, 7mm
- 부하비(load ratio) : 송출단피랑을 물의 유량으로 나눈 값, 3.3%, 6.6%, 10%
- 유속: 1.5m/s, 2.5m/s, 3.5m/s

이러한 실험변수에 영향을 받는 유체역학적 성능치는 다음과 같다.

- 이송농도 ( $C_T$ ) : 관내 슬러리의 체적점유도

$$C_T = \mu_s \cdot \frac{\overline{v_{wo}}}{v_s} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (1)$$

여기서,  $\overline{v_s}$ 는 입자의 평균 이동속도,

$\overline{v_{wo}}$ 는 물만의 유속,  $\mu_s$ 는 부하비,

$\rho_w$ 는 물의 밀도,  $\rho_s$ 는 입자의 밀도

- 슬립속도( $\overline{v_{sl}}$ ) : 입자에 대한 물의 상대속도

$$\overline{v_{sl}} = \overline{v_w} - \overline{v_s} \quad (2)$$

여기서,  $\overline{v_w}$ 는 물 유속을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{v_w} = \frac{\overline{v_{wo}}}{1 - C_T}$$

- 압력구배( $H_L/L$ ) : 단위길이당 손실수두

$$\frac{H_L}{L} = f \frac{1}{D} \frac{\overline{V_{wo}}^2}{2g}$$

여기서,  $H_L$ 는 직관부의 손실수두,

$L$ 은 손실수두를 측정할 처음과 끝점사이의 거리,

$f$ 는 마찰계수,  $D$ 는 관의 직경,  $g$ 는 중력가속도

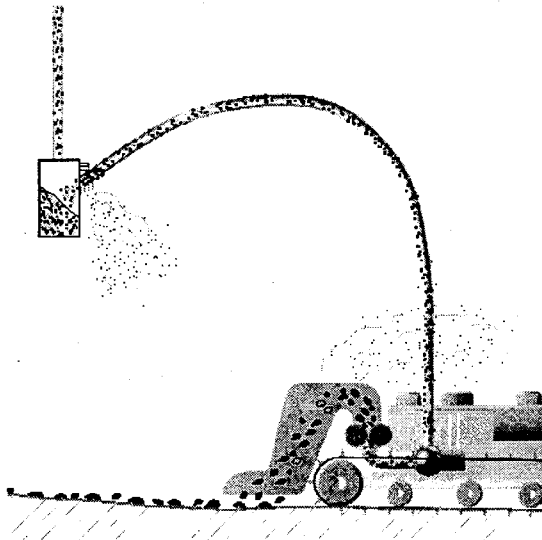


Fig. 1 Conceptual view of collecting operation of deep-sea manganese nodules : vehicle, pick-up device, conveying system consisted of crusher, duct, pump, and flexible hose.

### 3. 실험장치의 구성

Fig. 2와 Fig. 3은 본 실험장치의 구성을 보여준다. 입자는 단괴공급장치를 통해, 물은 회수탱크와 연결된 연결배관을 통해, 동시에 급수탱크로 공급되어 단괴처리덕트, 펌프, 수직관, 분리기까지 이송된다. 분리는 입자와 물을 분리하여 물은 회수탱크로, 입자는 단괴공급장치로 투입되게 한다.

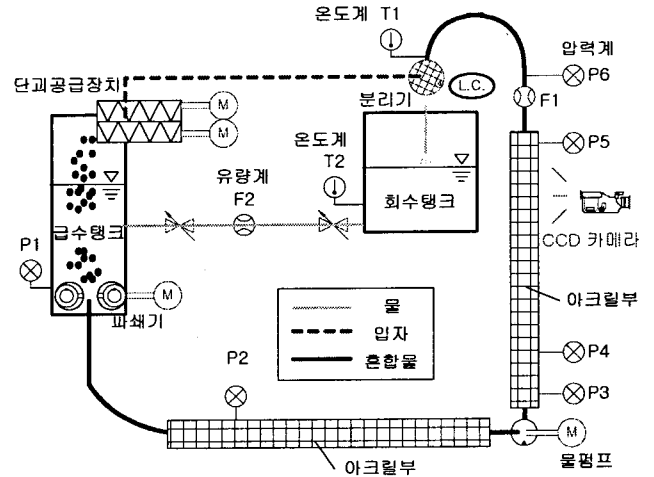


Fig. 2 System diagram of experiment facility including tanks and piping, arrangement of sensors and motors, all subsystems.

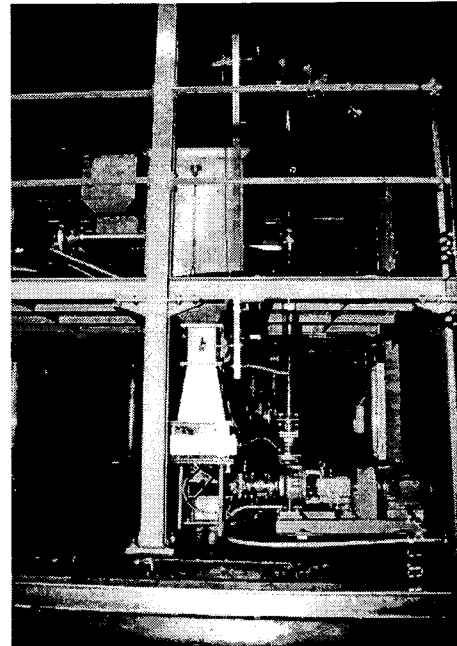


Fig. 3 Photo of experimental facility shows the recovery tank, feeder, pump, vertical pipe, pressure gauges and etc.

2개의 전자 유량계로 물만의 유량과 혼합물의 유량을, 6개의 압력센서로 압력구배를, CCD 카메라 이미지에 PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 사용하여 유리구슬의 이동속도를 측정함으로써 이송농도를 산출하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 부하비 6.6%일 때 Eq.2에서 정의된 슬립속도와 유속의 관계를 보여준다. 속도가 빠를수록 슬립속도는 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 5는 무차원수인 레이놀즈 수( $Re: 0.66 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ )와 이송농도의 관계를 부하비 및 입자크기에 대해 나타낸 그래프이다. 여기서  $Re$ 는 관직경이 50mm로 항상 일정하고 온도 변화가 크지 않으므로 유량에 거의 비례한다.

Fig. 5에서 몇 가지 사실을 고찰할 수 있었다.

- 입자 크기가 클수록 이송농도가 커진다.
- 부하비에 비례하여 이송농도가 증가한다.
- $Re$ 가 작을수록 이송농도가 증가한다.

$Re$ 에 대한 이송농도 변화원인은 유속이 자유낙하속도에 가깝게 줄어들면 입자의 원활한 이송이 어려우므로,  $Re$ 가 감소하게 되면 이송농도는 급격히 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 6는  $Re$ 와 압력구배의 관계를 부하비 및 입자크기에 대해 나타낸 그래프이다. 입자 없이 물만을 순환시켰을 때 측정된 압력구배와 Moody 차트에서 관내 거칠기가 거의 없는 부드러운 파이프(smooth pipe)에 대한 손실계수를 Eq. 3에 적용하여 구한 값을 겹쳐서 나타내었다.

Fig. 6에서 몇 가지 결론 도출이 가능하였다.

- 단일유동(물) 측정 결과 본 실험조건에서는 Moody 차트의 부드러운(smooth) 관벽조건보다 압력손실이 컸다.
- 압력구배는 부하비에 비례하여 증가한다.
- 입자크기의 영향은 상대적으로 작다.
- 동일한 펌프속도에 대해 부하비가 증가할수록 슬러리 유속은 감소하며 이때 압력구배는 선형적으로 증가한다.

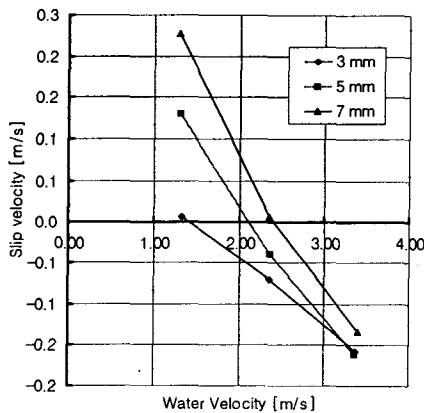


Fig. 4 Relationship between water velocity and slip velocity for load ratio, 6.6%

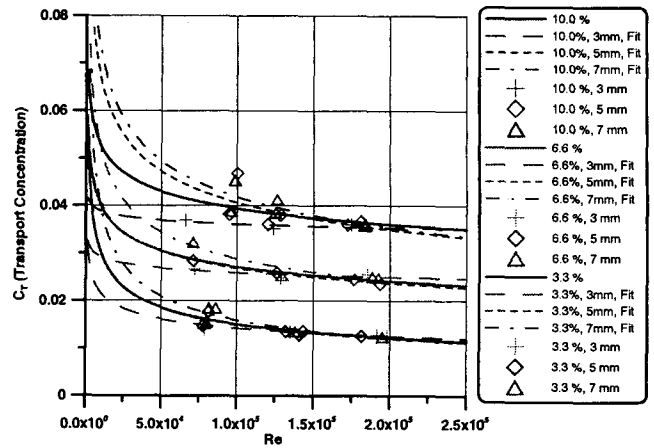


Fig. 5 Relationship between Reynolds number and transport concentration

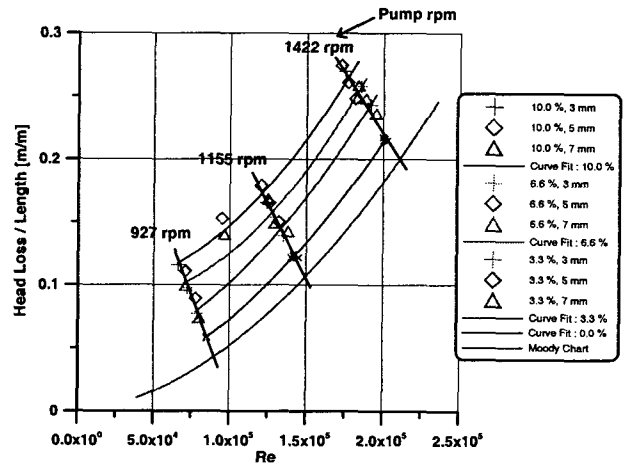


Fig. 6 Relationship between Reynolds number and pressure gradient.

#### 5. 결 론

심해저 망간단괴 집광기의 송출시스템의 설계를 위한 실험 중 첫 번째 단계로서 수직관에 대해 입자의 크기, 부하비, 유량에 대한 이송농도와 압력구배의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이송농도는 입자의 크기와 부하비에 비례하여 증가하며  $Re$ 가 어느 수준이상이 급격하게 증가하여, 관막힘으로 이어진다.
- (2) 압력구배는 부하비가 클수록 증가하나 입자의 크기에는 큰 영향을 받지 않는다.

이상의 정성적인 특성은 송출시스템의 설계 및 운용에 기본 자료로 활용될 것이며, 추후 수행될 경사관 및 진동관에서의 고액 슬러리 유동실험의 기초자료가 될 계획이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업 “심해저 광물자원 집광 및 채광운용기술 실용화 연구”의 일환으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Chung, J.S., Yarim, G., and Savasci, H.(1998), “Shape Effect of Solids on Pressure Drop in a 2-Phase Vertically Upward Transport: Silica Sands and Spherical Beads”, Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference Technology Conference, pp 58~65
- Engelmann, H.E.(1878), “Vertical Hydraulic Lifting of Large-size Particles - A Contribution to Marine Mining”, Offshore Technology Conference, pp 731~740
- Newitt, D.M., Richardson, J.F.,and Gliddon, B.J.(1961), “Hydraulic Conveying of Solids in Vertical Pipes ”, Trans Inst Chemical Engineering, Vol 39, pp 93~100