



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 8월
석사학위논문

황화광의 컬럼부선에서 가스분산특성 및 바이어스의 제어

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

안 기 선

황화광의 컬럼부선에서 가스분산특성 및 바이어스의 제어

Control of gas dispersion characteristics and bias
in column flotation of sulfide minerals

2019 년 08 월 23 일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

안 기 선

황화광의 컬럼부선에서 가스분산특성 및 바이어스의 제어

지도교수 박 철 현

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함.

2019 년 04 월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

안 기 선

안기선의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 최태진 (인)

위원 조선대학교 교수 박천영 (인)

위원 조선대학교 교수 박철현 (인)

2019 년 05 월

조선대학교 대학원

목 차

List of tables	II
List of figures	III
Abstract	VI
제1장. 서론	1
제2장. 컬럼부선 이론	9
제1절. 컬럼부선 개요	9
제2절. 가스분산특성	16
제3절. 바이어스	23
제3장. 시료 및 실험방법	26
제1절. 시료 특성	26
제2절. 실험방법	30
제4장. 결과 및 토의	36
제1절. 2상(액-기)의 컬럼부선 기초특성	36
제2절. 3상(고-액-기)의 컬럼부선 효율제어	47
제5장. 결론	62
참고문헌	65
부 록	74
Nomenclature	83
Glossary	84

List of Tables

Table 1.1.1. Status of bubble size estimation and gas dispersion characteristics	8
Table 2.1.1. Methods of bubble generation	12
Table 3.1.1. XRF analysis of raw sample	27
Table 3.1.2. Particle size analysis of raw sample	28
Table 3.1.3. Particle size analysis of low grade concentrate	29
Table 3.2.1. Conditions of gas dispersion characteristics test (2phase)	35

List of Figures

Fig 2.1.1. Schematic diagram of Froth flotation mechanism	10
Fig 2.1.2. Schematic of flotation column	11
Fig 2.1.3. Types of bubble generator	12
Fig 2.1.4. Porous type sparger	14
Fig 2.1.5. Cavitation type sparger	14
Fig 2.1.6 In-line mixer type sparger	15
Fig 2.2.1 photographs of bubble size measurement	17
Fig 2.2.2. Measurement of gas holdup by pressure difference:	
(a) general, (b) using water manometer	20
Fig 2.2.3. Schematic of bubble surface area rate (S_b)	22
Fig 2.3.1. Structure froth suggested from 2-phase study	23
Fig 2.3.2. Volumetric flowrates in flotation column	25
Fig 3.1.1. XRD analysis of raw sample	26
Fig 3.1.2. SEM & EDS analysis of raw sample	27
Fig 3.2.1 Lab-scale flotation column of porous type	30
Fig 3.2.2. Lab-scale flotation column of cavitation type	31
Fig 3.2.3. Lab-scale flotation column of inline-mixer type	31
Fig 3.2.4 High-speed camera set	33
Fig 3.2.5 Photograph of bubble size measurement using ZEISS program	33
Fig 3.2.6. Bubble size measurement system	34

Fig 3.2.7. Schematic of column flotation process in 3 phase	35
Fig 4.1.1. Comparison of surface tension by frother types	36
Fig 4.1.2. Effect of frother (Pine Oil) dosage on bubble size ($J_g = 0.93\text{cm/s}$)	37
Fig 4.1.3. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in porous type	39
Fig 4.1.4. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in porous type	40
Fig 4.1.5. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in Cavitation type	41
Fig 4.1.6. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in Cavitation type	42
Fig 4.1.7. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in Inline-mixer type	43
Fig 4.1.8. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in Inline-mixer type	44
Fig 4.1.9. Comparison of measured and estimated bubble size in porous type column	45
Fig 4.1.10. Comparison of measured and estimated bubble size in Cavitation type column	46
Fig 4.1.11. Comparison of measured and estimated bubble size in Inline-mixer type column	46
Fig 4.2.1. Effect of superficial gas rate on grade and recovery of gold in preliminary tests	48

Fig 4.2.2. Effect of superficial wash water rate on grade and recovery of gold in preliminary tests48

Fig 4.2.3. Relationship of superficial gas rate (J_g) and gas holdup (ϵ_g) ··49

Fig 4.2.4. Relationship of superficial gas rate (J_g) and bubble size (d_b) ·50

Fig 4.2.5. Change of bubble size with increasing superficial gas rate ···50

Fig 4.2.6. Relationship of Bubble size (d_b) and Gas holdup (ϵ_g)51

Fig 4.2.7. Relationship of gas holdup (ϵ_g) and Superficial bubble surface rate (S_b)52

Fig 4.2.8. Relationship of superficial gas rate (J_g) and carrying rate (Cr) ··53

Fig 4.2.9. Relationship of gas holdup (ϵ_g) and carrying rate (Cr)53

Fig 4.2.10. Relationship of superficial gas rate (J_g) and bias rate (J_B) ···54

Fig 4.2.11. Relationship of gas holdup (ϵ_g) and bias rate (J_B)55

Fig 4.2.12. Relationship of superficial wash water rate (J_w) and water recovery (R_w)56

Fig 4.2.13. Relationship of superficial gas rate (J_g) and water recovery (R_w)56

Fig 4.2.14. Relationship of bias rate (J_B) and water recovery (R_w)57

Fig 4.2.15. Grade and recovery of gold as function of gas rate (J_g) ····58

Fig 4.2.16. Decrease of cleaning zone as increase of superficial wash water rate (J_w)59

Fig 4.2.17. Relationship of grade and recovery Vs. water recovery (R_w)60

Fig 4.2.18. Stereomicroscope photographs of concentrate & tailings ····61

Abstract

Control of gas dispersion characteristics and bias in column flotation of sulfide minerals

By An, Ki-Seon

Advisor : Prof. Park, Chul-Hyun

Dept. of Energy & Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

The development of a separation technique that can recover low grade ores as well as solve tailings problems is a growing necessity. Column flotation has many advantages over conventional flotation owing to its ability to effectively reduce entrainment of fine gangue minerals due to less turbulence in the pulp, having a deep froth bed and using wash water to drain back the entrained gangue. Hence, flotation column has been installed at diverse plants and extensively released in the world.

The purpose of this study is to establish systematically the relationships of main parameters, and mechanisms of flotation column for improving separation efficiency of korean low grade ores. So gas dispersion characteristic such as superficial gas velocity (J_g), bubble size (d_b), gas holdup (ϵ_g) and bubble surface area flux (S_b) have been investigated in gas-liquid 2 phase and then carrying rate and water bias for improving flotation efficiency of gold bearing sulfide ore have been evaluated in gas-slurry 3 phase, using flotation columns equipped with porous, cavitation and inline-mixer sparger.

The gas dispersion characteristic in gas-liquid 2 phase showed that surface tension was the lowest at MIBC among different frothers and bubble size decreased as frother concentration increased. Also mean bubble size (0.613mm) was the smallest at cavitation among porous, inline mixer and cavitation spargers. Measured versus calculated bubble size (d_b) could satisfy $\pm 15 \sim 20\%$ of error ranges in the literatures. From this method the empirical relationship to control the bubble size has been developed.

The results of estimation of carrying rate and water bias in 3 phase seemed that grade and recovery of Au can be improved with controlling a superficial gas rate related upstream and a wash water rate related downstream because the carrying rate increased as superficial gas rate and gas holdup increased, however the bias reversed.

From the results of column flotation for improving grade of gold bearing sulfide ore, we could product the concentrate of Au 150g/t grade with 81% recovery from Au 60g/t concentrate of conventional flotation. Also, a high grade of Au 250g/t was obtained at water recovery (R_w) of approximately 40% although the Au recovery was decreased to 68%.

In the future work, based on the systematic approach presented in this study, we will extend it to mixing models, carrying capacity and column scale-up which can be used in process control.

제 1 장. 서 론

기반산업 및 첨단산업의 발달에 따라 광물자원의 수요는 지속적으로 증가하고 있으나 고품위광은 장기적인 채굴로 인해 고갈상태에 이르고 있다. 따라서 저품위광 및 광미로부터 유용광물 회수를 위한 기술 개발이 필요한 실정이다. 일반적으로 비중선별, 자력선별, 정전선별과 같은 물리적인 선별법에 비해 물리·화학적 선별법인 부유선별은 미립자 저품위광의 선별에 보다 더 효과적인 방법으로 알려져 있다.

부유선별은 물질의 소수성 및 친수성 차이를 이용하여 소수성 물질을 기포에 부착시켜 회수하는 선별법으로써, 오랜 기간 동안 자원처리 분야에서 유용자원의 분리/회수에 적용 및 활용되고 있다. 그러나 일반부선(Conventional flotation)은 고속의 임펠러 회전에 의해 난류 및 흡기(Entrainment) 현상이 발생되어 미립자광의 선별효율이 저하될 수 있다(Altun et al, 2006). 이에 비해 컬럼부선(Column flotation)은 기포상승에 의한 상향류와 광액/세척수에 의한 하향류에 의한 믹싱(Mixing) 방법으로, 난류 및 흡기현상을 최소화시킬 수 있고 조선(Rougher), 정선(Cleaner) 및 청소(Scavenger) 부분의 일체화로 구조적 효율성을 높일 수 있다(Sastri et al, 1988).

컬럼부선은 1960년대부터 아메리카, 아프리카 및 호주와 같은 자원부국에서 개발 운용되어 왔으며 현재는 전 세계에서 약 500기 이상의 자동화 플랜트가 설치 및 운용되고 있다. 최근 중국은 컬럼부선에 대한 연구개발을 활발히 진행 중에 있고 가장 많은 플랜트가 설치 및 가동 중에 있다(Harbort and Clarke, 2017).

자원빈국인 우리나라의 경우, 저품위광 및 미립광의 선별효율 향상 기술개발에 있어서 현재 약 10기 미만의 연구용 부선컬럼만이 일부 설치되어 있으나 광업현장(선광장) 적용은 전무한 상태이다. 따라서 국내 현장 적용을 위한 컬럼부선의 주요변수, 가동조건 및 상호관계 등 기초적인 운용체계의 정립이

시급한 실정이다. 또한 자원수급 등 해외 광물자원개발에 있어서 국제적 경쟁력을 높일 수 있는 국내 독자적인 컬럼부선 선별시스템 개발이 요구된다.

본 연구의 목적은 컬럼부선의 구조적 메커니즘을 체계적으로 수립하고 국내 저품위 미립자광의 선별효율 제고를 위한 기초특성 인자들의 상호관계를 정립 및 제어 하는데 있다. 이를 위해 먼저 액체 및 기체 2상에서 가스속도(Superficial gas rate), 가스홀드업(Gas holdup), 기포크기(Bubble size), 기포표면적비(Bubble surface area rate) 등의 가스분산특성(Gas dispersion characteristic) 인자들의 상호관계를 파악하였으며 2상에서의 연구결과를 기반으로, 액체, 기체 및 고체 3상에서 황화광물의 선별효율 향상을 위한 가스분산특성 및 바이어스(Bias) 제어 연구를 수행하였다.

아래 섹션은 본 연구의 목적과 연구내용에 관련된 문헌 연구로써 종래의 연구결과와 최근 연구동향을 기술하였다.

1. 문헌연구

컬럼부선의 주요변수, 가동조건 및 상호관계 등 기초적인 운용체계의 정립에 관련된 문헌을 체계적으로 정리하였다. 종래연구에서는 포집대(Collection zone)에서의 가스분산특성연구와 세척대(Cleaning zone)에서의 바이어스 및 물 회수율(Water recovery) 그리고 황화광물의 부선에 관한 문헌을 조사하였으며 최근 연구 동향으로써 직접적인 가스분산특성 측정 연구 및 컬럼부선의 응용연구 그리고 간단한 국내 연구동향을 조사하였다.

종래의 연구

컬럼부선의 구조는 크게 포집대와 세척대로 대별된다. 포집대는 기포발생장치(Sparger)에서 발생된 기포의 상승과 급광 및 세척수 하강에 따른 믹싱이 이루어지고 유용광물이 선택적으로 기포에 부착되어 세척대로 부유시킨다.

세척대는 바이어스에 의해 무용광물을 포집대로 떨어뜨리는 역할을 한다.

컬럼부선의 기초특성 정립에 관한 연구는 1980-90년대부터 지속적으로 진행되어왔다. 대표적으로 캐나다의 Finch and Dobby 그룹은 컬럼 포집대의 가스분산특성, 컬렉션모델(Collection model), 믹싱모델(Mixing model)의 연구와 세척대의 기포층 메커니즘, 운송율(Carrying rate), 바이어스의 연구 그리고 스케일업(Scale-up) 연구 등 컬럼에서 각 존들의 상호역학적 관계 규명과 모델, 선별효율에 관한 기초적 체계를 정립하였다(Finch and Dobby, 1991).

포집대에서 기포발생, 믹싱 및 유용광물의 회수에 중요한 역할을 하는 가스분산특성은 기포크기, 가스홀드업, 가스속도 및 기포표면적비 등의 요소들로 나타낼 수 있다(Gomez and Finch, 2007). 특히 기포크기는 부선흡율에 큰 영향을 미치는 주요한 인자로서 기포크기는 기계적인 요소(기포발생장치, 난류, 및 가스의 유량 등), 용액의 화학적반응(기포제 종류 및 농도), 펄스의 특성(밀도 및 점도등) 및 기타 요인(온도 및 대기압 등)에 따라 다르게 생성이 된다(Vinnett et al, 2014).

Yianatos et al, (1987)는 부선흡율에 영향을 미치는 기포 군집체의 기포크기 계산에 있어서, Masliyah, (1979)의 간섭침강식을 이용하여 정광으로 배출된 기포크기와 비교하고 관계식을 도출하여 기포크기를 예측 가능하도록 관계를 정립하였다. 이후 더 정확한 기포크기를 측정하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되었으며 2000년대에는 다양한 방법을 이용해 가스홀드업 및 기포크기를 측정할 수 있는 기술적 진보를 이루었다. Chen et al, (2001)은 특정 구간의 기포를 외부의 Bubble viewer 장치에 추출하여 기포크기를 측정하였으며 이후 일반부선기의 기포크기 측정에도 적용하였다. Rodrigues and Rubio, (2003)는 컬럼의 벽에 45°의 관을 삽입하여 얇은 cell에 기포를 추출하고 기포크기를 측정할 수 있도록 고안했다. 한편 Schwarz and Alexander, (2006)는 앞서 언급한 Viewer 및 cell의 두 방식을 응용하여 기포크기를 측정하였다. 그러나 컬럼의 구조나 크기에 따라 기포크기가 변화하기 때문에 기존의 이런 방법들은 컬럼의 외부로 기포를 추출함으로써 컬럼내부의 실질적

인 조건을 반영한 것으로 보기에 다소 무리가 있다. 또한 Bao et al, (2008)은 컴퓨터 이미지 분석 시스템을 구축하여 컬럼 상부의 기포크기 및 상태를 조사했으며 이후 일반부선기에도 적용하였다.

Nesset et al, (2006)은 일반부선에서 가스속도, 가스홀드업, 기포크기를 통해 기포표면적 비를 도출하는 연구를 수행했다. 가스속도 및 가스홀드업 측정을 위해 각각 가스압력센서과 챔버압력차를 이용하였다. Gomez and Finch, (2007)는 이를 확장시켜 컬럼 플랜트의 가스분산특성을 측정 및 컬럼의 상태를 점검할 수 있는 방법을 개발하였다.

포집대에서 가스홀드업과 기포의 관련 연구로써, Banisi et al, (1995-I)는 전기전도도 차를 이용해 컬럼내부의 가스홀드업을 측정하여 가스속도 증가에 따라 가스홀드업이 증가하는 것을 확인하였고 다음 연구에서 이들은 (Banisi et al, 1995-II) 2상과 3상에서 가스홀드업 변화에 관한 실험을 수행한 결과, 고체 혼입시 더 작고 안정된 기포를 형성시키고 가스홀드업을 감소시키는 것을 확인하였다. 포집대의 가스분산특성에 있어서 펄프의 농도도 중요한 요소이다. 광액농도가 높으면 가스홀드업이 낮아지고 회수율을 저하시킬 수도 있다. 농도가 높게 되면 간섭 및 응집력이 강해져 충분한 상승이 어려울 수 있다(Perez Garibay et al, 2002).

일반적으로 포집대에서 가스분산특성은 액체-기체 2상에서의 연구가 주를 이루고 있으며 세척대에서 운송율, 물회수율 및 바이어스의 효과는 고체-액체-기체 3상에의 연구가 주로 진행되고 있다. 세척수는 세척대에 필요한 물을 공급하고 안정화시키는데 투과되는 물의 비율을 양의 바이어스(positive bias)라고 하며 역류하여 배출되는 물을 음의 바이어스(negative bias)라고 한다(Finch and Dobby, 1991). 바이어스는 급광량에 큰 영향을 받으며 광물입자의 크기 및 비중이 증가함에 따라 흡기는 감소한다(Maachar and Dobby, 1992). Falutsu and Dobby, (1989)는 세척대의 높이와 회수율과는 관계가 없음을 확인하였으며 다량의 바이어스는 세척대의 효과를 감소시키는 것으로 확인하였다. Pyecha et al, (2006)은 마이크로셀을 이용한 황화광의 컬럼부선에

서 바이어스의 증가는 품위를 증가시키고 회수율을 감소시키는 것으로 확인하였다. Yianatos and Henriquez, (2007)는 광액과 기포층의 경계면(Interface)에서 가스속도는 다양한 크기의 기포를 발생시키며 기포크기가 0.5mm보다 작고 2mm보다 클 때 기포표면적 비를 감소시키고 운송능력을 저하시키는 것으로 확인하였다.

석탄회에 대한 일반부선과 컬럼부선의 효율비교 관련 연구에 있어서 수회 정선과정을 거친 일반부선보다 2회 정선의 컬럼부선에서 석탄회 중에 가연분을 9%에서 6.5%로 감소시킬 수 있었다(Honaker and Mohanty, 1996).

일반적으로 금속광물의 경우 대부분 황화광물로부터 회수되는데 이들은 다양한 금속광물을 포함하고 있어 복잡한 부선공정에 의해 처리되고 있다. 컬럼부선은 대부분 품위향상 공정에 주로 이용되고 있으며 단일공정으로 활용되고 있다. 기존 연구에서는 컬럼부선의 변수제어 및 모델연구에 비해 잔세이트 등의 포수제 관련 연구가 주를 이루었다. Wang and Forsberg, (1991)는 전기화학 및 FTIR 분광 기술을 이용하여 포집대에서 Pyrite의 표면에 잔세이트가 강하게 결합되어 있는 것을 확인했다. 반면 Trahar et al, (1994)는 포수제 첨가없이 pH에 따른 황화광의 부유훈성을 조사하였으며 그 결과, 황철석(Pyrite)는 약산성에서 부유하나 방연석(Galena) 및 황동석(Chalcopyrite)는 알카리 영역에서 부유하는 것을 확인하였다. 상기 연구들은 pH 조절을 통해 황화광의 선택적인 선별 가능성을 제시하였다. 앞서 언급한바와 같이 황화광은 대부분 복합광으로 존재하기 때문에 이들의 단체분리를 위해 미분쇄공정을 통해 미립시료가 제조된다. 일반부선시 미립자의 응집 및 흡기현상으로 인해 선별효율이 감소하게 되는데, Matis et al, (1993)은 컬럼부선을 적용하여 미립자 선별에 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.

최근 연구 동향

기포크기 및 가스홀드업 측정에 있어서 2000년대 초반까지 주로 간접적인 방법이 이용되었으며 이를 통해 컬럼의 가스분산특성들이 평가되었으나 점차

광학기술의 발달로 직접적인 관찰 방법이 시도되고 있다. Seher et al, (2003)는 컬럼내부에서 상승하는 기포크기의 변화를 직접 촬영 및 측정하여 상승하는 기포들의 병합의 메커니즘을 확인하였다. Vadlakonda and Mangadoddy, (2017)은 전기 저항 토모그래피와 압력계를 사용하여 컬럼내부를 모델화 하고 가스속도에 따른 기포의 분포를 관찰했으며 포러스타입 스파저의 구멍수 및 컬럼의 직경이 가스홀드업에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 Vazirizadeh et al, (2016)은 기포에 부착된 광물을 직접 촬영하여 광물의 유무에 따른 가스홀드업의 영향을 조사한 바, 광물의 부착은 기포들의 병합을 촉진시키고 더 넓은 범위의 기포를 형성시키는 것을 제안했다.

Maldonado et al, (2015)는 가스속도와 기포제 농도 등의 가동조건들을 데이터 베이스화하여 기포의 크기 및 가스홀드업 상태에 따라 이들 변수들을 제어할 수 있는 장치를 고안하였다. 이 방법은 컬럼내의 가스분산을 통해 컬럼부선의 선별효율을 제어하기 위한 기초연구로써 중요한 의미가 있다고 판단된다. 그러나 세척수의 영향이 평가되지 않고 액체 및 기체 2상에서의 제어 실험으로써 아직 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 한편 Vinnett et al, (2014)는 산업용 일반부선기에서 가스속도 대비 기포크기 변화 예측의 정확성을 비교하는 연구를 하였다. 연구결과, 가스속도가 낮은 구간에서는 예측이 가능하지만 가스속도 1.2cm/s이상에서는 난류 및 기포병합의 영향으로 급격히 기포크기가 상승하는 현상을 발견하였다. 현재 영상기술의 발전으로 기포에 부착된 광물을 보다 선명하게 확인할 수 있는데, 기포의 크기가 작아 질수록 운반능력이 증가하고 특히 100 μ m 이하의 미세기포는 거친 입자를 더 효율적으로 부착 및 동반상승하는 것을 확인할 수 있었다(Gomez et al, 2013). 그 외 컬럼부선의 가스분산특성에 관한 최근 연구 동향을 Table 1.1.1.에 나타내었다.

포집대 외에 세척대에서의 최근의 연구는 바이어스와 물 회수율이 기포층 안정화, 품위 및 회수율에 미치는 영향이 주를 이루고 있다. Tao et al, 2000은 안정성을 갖춘 기포층이 높은 품위와 회수율 나타내고 가스속도의 증가에

따라 기포의 안정 및 물 회수율이 증가되는 결과를 제시하였다. 특히 물 회수율은 가스속도와 기포층의 높이에 영향을 받기 때문에 기포층 내의 물 흐름과 기포층의 배수능력이 고려되어야 한다(Wang et al, 2016). 기포발생장치 종류 및 기포제농도는 세척대의 기포크기, 운송율, 정광입자의 품위와 크기에 영향을 미치는데, 기포발생장치의 강한 폭기(aeration)와 기포제농도의 증가는 기포층깊이(depth)와 유동성을 높여 품위 및 회수율을 증가시킬 수 있다(Pina et al, 2017).

국내에서 컬럼부선 연구에 대한 사례는 조선대학교의 컬럼모델연구, 석탄 광 및 복합황화광 연구의 극히 일부이며 거의 진행되지 않고 있다. 실제로 Oh-hyung Han 외 4인, (2014)은 미립의 석탄부선을 위해 일반부유선별 및 컬럼부선의 선별효율을 비교 하였으며 컬럼부선의 경우가 약 20%정도 더 높은 선별효율을 나타냈다. 이외에 이정언 외 7인(1999)이 컬럼부선을 적용하여 석탄회를 처리하기 위해 부선컬럼의 기초특성 연구를 진행하였으며 이를 통해 가스속도가 증가할 때 기포크기를 증가시키나 기포제가 증가하면 기포크기가 감소하는 것을 확인했다. 또한 이정언과 이재근(1999)은 역류형 컬럼부선기를 이용해 미연탄소의 분리효율과 부유특성을 분석하였으며 포수제 투입량의 증가는 소수성을 강화시켰고 평균 직경 500um의 미세기포에서 부유성이 양호한 것을 확인하였다. 엄남일 외 5인(2008)은 바텀에쉬에서 미연탄소제거를 위한 컬럼부선시 흡착효율은 미연탄소의 함량이 높을수록 증가하고 산성이나 알카리 영역에서는 감소하는 것으로 확인하였다. 이와 같이 국내는 컬럼부선 적용을 위한 연구가 일부 진행되고 있으나 컬럼의 구조적 메커니즘 관련 연구는 부족한 실정이다.

Table 1.1.1. Status of bubble size estimation and gas dispersion characteristics

Nationality	Topic	Author
Finland	Comparison of bubble detectors and size distribution estimators	Ilonen (2017)
Germany	Online bubble size analysis in micro flotation	Gulden (2018)
Italy	Bubble size distributions and shapes in annular gap bubble column	Besagni (2016)
Canada	Predictive control of the bubble size distribution in a two-phase pilot flotation column	Riquelme(2016)
U.S.A.	Characterization of bubble size distributions within a bubble column	Mohagheghian (2018)
Germany	Bubble size distributions with a shadow graphic optical probe	Lichti (2018)
China	Bubble properties measurement in bubble columns : From homogeneous to heterogeneous regime	Guan (2017)
India	Hydrodynamic study of two phase flow of column flotation using electrical resistance tomography and pressure probe techniques	Vadlakonda (2017)

제 2 장. 컬럼부선 이론

제 1 절. 컬럼부선 개요

부유선별은 분리하고자 하는 고체 입자의 표면특성, 즉 습윤도(wettability)의 차이를 이용하는 물리·화학적 선별법이다. 물과 친하여 물이 잘 스며드는 특성은 친수성(hydrophilic)이라 하며 물을 거부하여 물이 잘 스며들지 않는 특성을 소수성(hydrophobic)이라고 한다. 이런 특성을 이용하여 광액 내에서 기체를 주입하여 소수성 입자들을 선택적으로 기포에 부착시켜 수면에 떠오르게 하고 친수성 입자들은 광액에 잔존하여 서로 분리가 가능하다. Fig 2.1.1.은 부유선별 메커니즘을 도식화한 것으로, 셀(cell) 내에서는 충돌, 부착 및 탈착의 순서로 기포와 목적광물이 부착한다. 본 현상의 빈도 및 효율에 의해 선별효율이 달라지기 때문에 부유선별에 있어서 매우 중요한 과정이다.

초기의 부유선별기는 교반실과 포말실이 각각 분리되어 있어 공기 주입량의 조절이 어려운 단점이 있었으나 이를 개선한 덴버타입(Denver type)의 부선장치가 개발되어 주요 선광플랜트에서 활용되고 있다. 덴버타입의 특징은 포말실이 교반실 위에 위치하여 부피 최소화는 물론, 각 구마다 공기 유입량을 조절할 수 있다. 부유선별은 목적광물의 선택적 회수가 가능하기 때문에 다양한 광물의 회수에 활용되어 왔다.

최근 전세계적으로 고품위 광물이 고갈되어감에 따라 부유선별에 대한 관심이 높고 보다 활발한 연구가 진행되고 있다. 일반부선은 교반실 내부의 심한 난류 및 짧은 기포층으로 인해 미립의 맥석들이 수류를 따라 흡기(Entrainment)되기 때문에 선별효율의 저하를 야기한다. 이에 반해 컬럼부선은 기포상승에 의한 상향류와 광액/세척수에 의한 하향류에 의한 믹싱 방법으로, 탑승(Entrapment) 및 흡기현상을 최소화시킬 수 있고 조선, 정선 및 청소 부분의 일체화로 구조적 효율성을 높일 수 있다(Sastri et al, 1988).

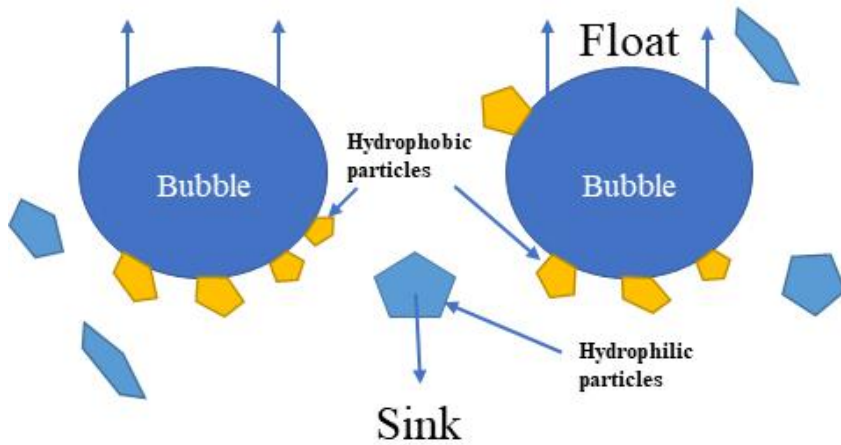


Fig 2.1.1. Schematic diagram of Froth flotation mechanism.

부선컬럼의 체계

Fig 2.1.2은 컬럼부선기의 기본 구조를 나타낸 것으로써, 크게 포집대 (collection zone)과 세척대(cleaning zone)으로 대별되며 포집대 아래의 스파저 (Sparger)가 장착된 기포발생부가 있다. 하부로부터 기포상승으로 발생된 상향류와 상부로부터 광액과 세척수 침강으로 발생된 하향류의 믹싱이 포집대에서 이루어지고 이때 충돌, 부착 및 탈착의 과정을 통해 목적광물이 기포에 부착되고 기포층을 형성하는 세척대의 세척수에 의해 탑승 및 흡기된 맥석광물 최소화시킴으로써 고품위의 정광을 회수한다.

부선컬럼은 일반 부선기와 비교하여 기포발생 방법과 세척수 사용유무의 차이가 있다. 기포생성의 방법은 다양한 형태로 발전해 왔다. 일반부선의 경우 임펠러(Impeller)의 회전에 의해 기포를 발생시키며 공기유입 방법은 자연 유입 방식과 외부의 가스주입 방식이 있다. 임펠러 방식은 광액의 난류 및

회전 속도에 기포의 분포가 불균질하기 때문에 맥석광물의 혼입이 야기되고 있다. 이에 반해 부선컬럼은 스파저(Sparger)라고 하는 별도의 공기발생 장치가 있어 난류를 최소화하고 기포의 분포도를 제어할 수 있는 장점이 있다. 따라서 컬럼에 적합한 기포생성 장치 타입의 개발이 지속적으로 이루어져 왔으며 개발된 다양한 기포발생장치들을 Fig 2.1.3. 과 Table 2.1.1.에 나타내었다.

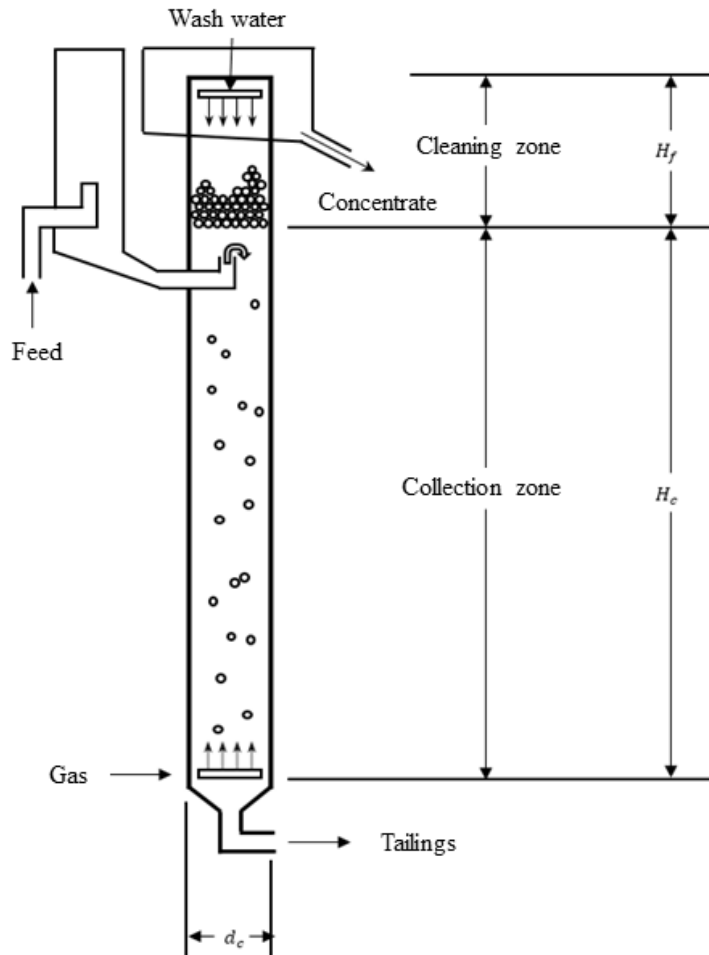


Fig 2.1.2. Schematic of flotation column (Yianatos et al., 1986b).

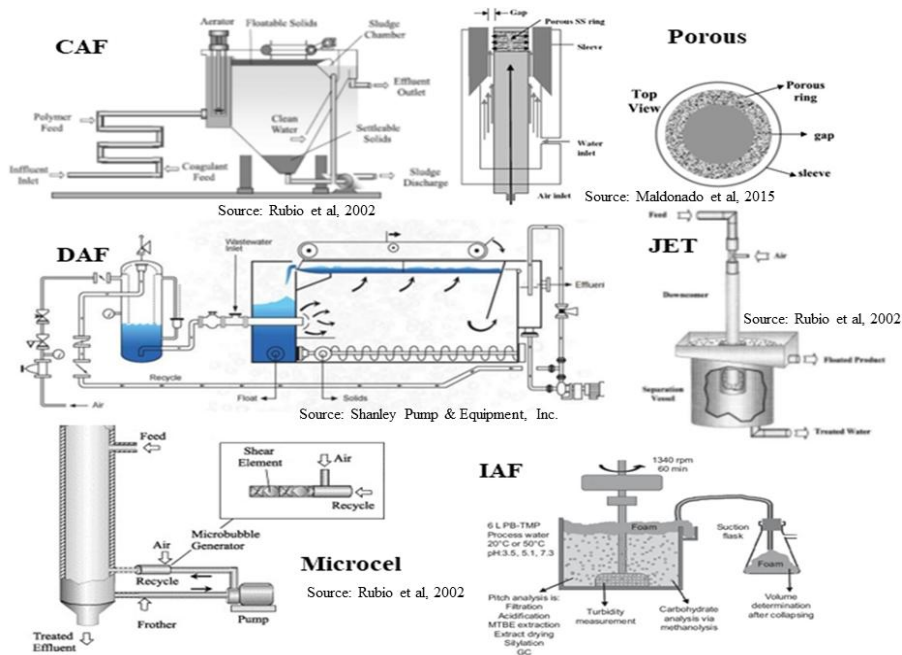


Fig 2.1.3. Types of bubble generator

Table 2.1.1. Methods of bubble generation

Flotation techniques	Bubble generation
CAF (cavitation air flotation)	Mechanical agitation (high speed)
DAF (dissolved air flotation)	Reduction in pressure of water supersaturated at high pressures
Jet flotation	Gas aspiration nozzle to draw air into recycled water in a down-comer
Porous flotation	Injection of air through porous
Column flotation	Aeration of pulp with spargers (porous plate)
IAF (induced air flotation)	Mechanical agitation

기포발생장치

컬럼부선에 이용되는 기포발생장치(Sparger)의 종류는 포러스(Porous), 케비테이션(Cavitation) 및 인라인믹서(Inline-mixer) 타입이 있다.

Fig 2.1.4.는 포러스 스파저의 구조를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 압축가스가 미세공극을 통과하면서 기포가 생성되며 공극의 크기와 가스압력에 따라 기포의 크기와 분포도가 제어될 수 있다. 본 타입의 특징의 구조가 간단하고 제작이 용이하여 주로 실험용을 사용되고 있다.

Fig 2.1.5.은 케비테이션 스파저의 구조를 나타낸 것으로, 유체가 모래시계 모양의 좁은 목을 통과하여 배출될 때 발생하는 공동현상을 이용한 원리이다. 본 연구에 사용된 케비테이션 타입의 경우 순환된 유체가 좁은 목을 통과할 때 가스를 주입하여 더 미세한 기포를 발생시킨다. 케비테이션 타입의 특징은 좁은 목을 통과하는 유체의 압력이 높아질수록 공동현상이 커져 미세 기포의 발생이 용이해지며 소형으로 제조가 가능하며 대량 제조가 가능하다.

Fig 2.1.6.은 인라인믹서 스파저의 구조를 나타낸 것으로, 유체를 강한 압력으로 밀어주면 믹서를 통과하며 유체가 잘게 쪼개지며 기포를 발생시킨다. 이와 같이 스파저의 종류에 따라 기포의 발생방법과 크기 및 분포가 다르므로 이들 종류에 따른 컬럼의 가스분산특성에 대한 영향과 평가는 부선효율을 좌우하는 중요한 파라미터가 될 수 있다. 기포발생장치는 컬럼부선의 구조에서 가장하부에 위치하고 있으며 발생된 기포는 상승하며 포집대에서 낙하하는 펄프와 믹싱되며 선별이 이루어진다. 부착 및 탈착 과정을 거쳐 상승한 기포는 세척대에서 세척수 속도에 의존하여 회수율 및 품위에 영향을 미치는 데 이와 관련된 포집대 및 세척대에 관련된 기초특성은 제 2절에서 자세하게 기술된다.

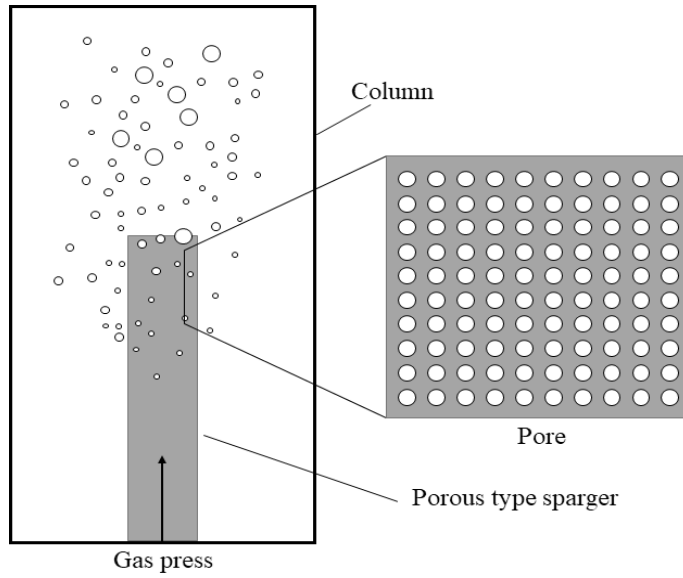


Fig 2.1.4. Porous type sparger

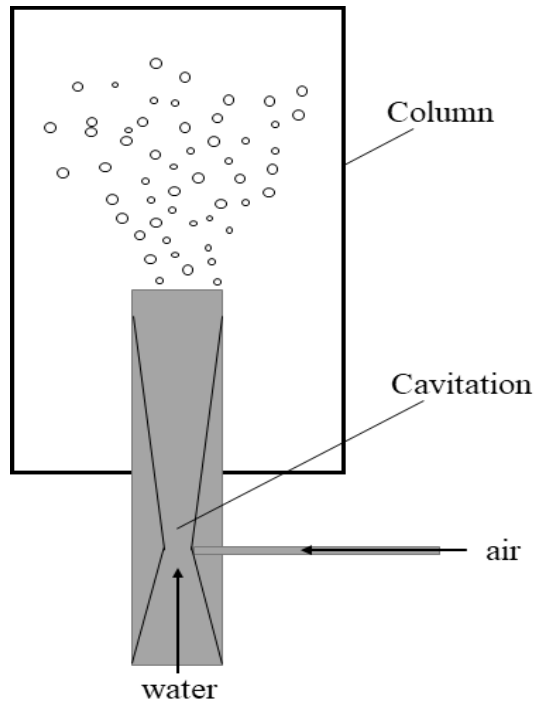


Fig 2.1.5. Cavitation type sparger

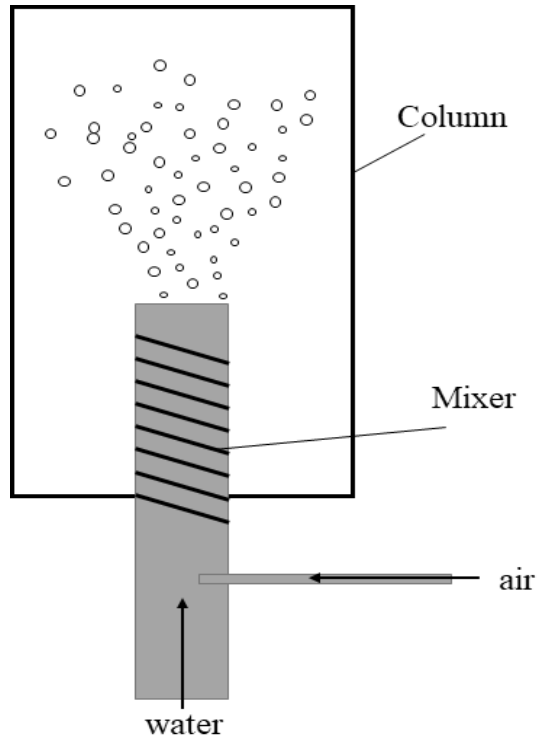


Fig 2.1.6 In-line mixer type sparger

제 2 절. 가스분산특성

컬럼부선에서 가스분산특성(Gas dispersion characteristic)은 앞서 언급하였듯이 선별효율의 예측 및 제어에 있어서 중요한 요소이다. 가스분산특성은 컬럼내부에서 기포생성, 기포분포, 분산 및 상승을 말하는 것으로 가스속도 및 슬러리 속도와 밀접한 관련을 가지고 있으며 주로 2상에서 기초적인 특성 평가가 이루어지고 이를 기반으로 광역이 적용된 3상에서의 현상을 이해할 수 있다.

기포크기

부유선별에서 기포는 목적하는 광물을 직접적으로 운송하는 중요한 매개체이다. 기포크기(Bubble size)의 변화는 기포의 체류 시간, 기포표면적비 및 운송율과 밀접한 관계가 있기 때문에 기포크기의 제어는 컬럼부선 효율의 최적화에 기여할 수 있다. 따라서 국외의 경우 기포크기의 측정 및 제어 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 기포측정 방법은 Viewing box를 이용하여 컬럼내부의 기포를 추출 및 감속시키고 크기를 관찰한다. 상기 방법은 Flat cell, Cuvette cell, Luba tube, Bubble viewer 및 Viewing chamber 등에 응용되어 이미지를 통해 크기를 측정한다. 이외에도 전기저항도, 육안관찰, 다공성판 및 관계식이 기포크기 측정에 이용된다(Rodrigues and Rubio, 2003).

그러나 이러한 기포크기 측정방법은 컬럼내부의 기포를 직접 측정하지 않아 오차가 발생할 확률이 높다고 보고되고 있다. Fig 2.2.1.은 최근 개발된 영상기술을 이용한 것으로 컬럼내부의 기포를 직접 촬영하여 기포의 크기를 측정하고 산정하는 방법이 사용되고 있다. 직접적으로 관찰된 기포의 크기를 가스분산특성에 따라서 요소를 통해 예측이 가능하다면 기포크기의 제어를

통해 선별효율의 제어가 가능할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 실제 측정된 기포와 예측된 기포의 비교를 통해 기포크기의 제어를 위한 기초 연구를 수행하였으며 오차를 줄이고자 초고속 카메라를 이용하여 컬럼내부의 기포를 실측하였다.

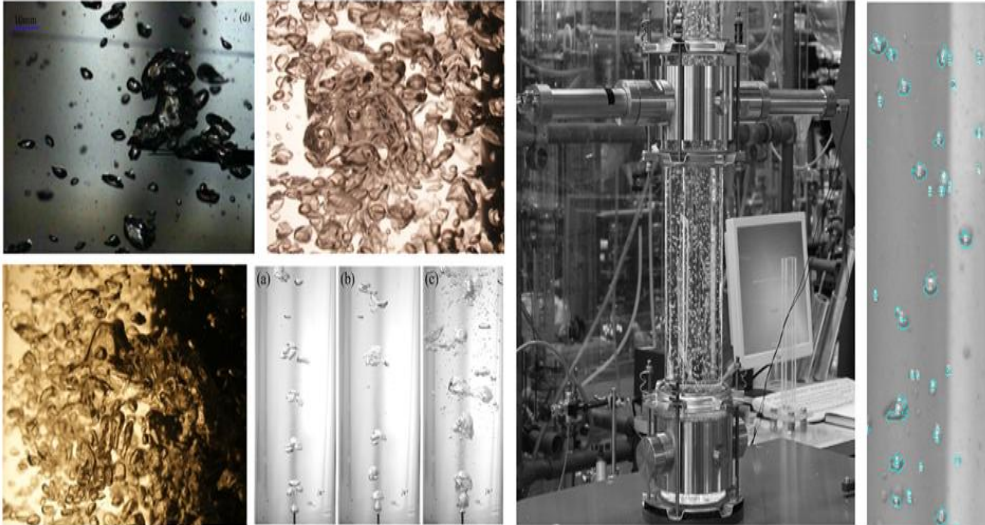


Fig 2.2.1. Photographs of bubble size measurement.

기포크기는 식 2.2.1의 Wallis의 표류유동이론(Drift flux)과 식 2.2.2의 Masliyah의 간섭침강식(Hindered settling equations)을 이용하여 산정할 수 있다. (Finch and Dobby, 1991). 이 두식의 상대속도 U_s 가 일치할 때까지 주어진 변수들을 반복적으로 대입하여 기포의 크기를 산출할 수 있다.

$$U_s = \frac{J_g}{\epsilon_g} \pm \frac{J_l}{(1 - \epsilon_g)} \quad (\text{Wallis - Drift flux}) \quad (\text{식 2.2.1})$$

$$U_s = \frac{gd_b^2 \rho_l (1 - \epsilon_g)^{m-1}}{18\mu_l (1 - 0.15 Re_{bs}^{0.687})} \quad (\text{Masliyah - Hindered settling equations}) \quad (\text{식 2.2.2})$$

가스속도 및 액체의 속도는 다음 식 2.2.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c}, \quad J_l = \frac{Q_l}{A_c} \quad (\text{식 2.2.3})$$

여기서 J_g 는 가스속도, J_l 은 액체(슬러리)속도, Q_g 는 가스유량, Q_l 은 액체(슬러리)유량 그리고 A_c 는 컬럼의 단면적이다.

표류유동이론의 경우 가스속도, 액체속도 및 가스홀드업의 측정에 의해 구할 수 있으며 간섭침강식은 식 2.2.4 ~ 식 2.2.7을 통해 구할 수 있다.

$$Re_{bs} = \frac{d_b U_{sg} \rho_{sl} (1 - \epsilon_g)}{\mu_{sl}} \quad (\text{식 2.2.4})$$

그리고

$$F(1 - \epsilon_g) = (1 - \epsilon_g)^{m-1} \quad (\text{식 2.2.5})$$

여기서

$$m = [4.45 + 18(d_b/d_c)] Re_b^{-0.1} \quad 1 < Re_b < 200 \quad (\text{식 2.2.6a})$$

$$m = 4.45 Re_b^{-0.1} \quad 200 < Re_b < 500 \quad (\text{식 2.2.6b})$$

이때

$$Re_b = \frac{d_b U_b \rho_{sl}}{\mu_{sl}} \quad (\text{식 2.2.7})$$

U_b 는 단일기포의 최대상승 속도로 전체 컬럼 내부에 하나의 기포가 있다는 가정을 하고 간섭침강식에서 ϵ_g 를 0으로 하여 계산할 수 있다. 또 다른 방법은 가스속도와 가스홀드업의 관계를 이용하여 구할 수 있는데 다음 식

2.2.8 과 같이 나타낼 수 있다(Banisi et al, 1995).

$$U_b = \left. \frac{dJ_g}{d\epsilon_g} \right|_{\epsilon_g \rightarrow 0} \quad (\text{식 2.2.8})$$

가스홀드업

기포발생장치에 의해 발생된 기포는 포집대의 액체를 대체하여 용적을 차지한다. 따라서 포집대 내에 가스의 부피비를 가스홀드업(Gas holdup)이라고 하며 선별효율에 영향을 미친다. 특히, 가스분산특성 중에서 가스홀드업은 다른 중요 변수들이 컬럼내부에서 기포와의 상호작용을 통해 특성을 갖는 중요한 역할을 한다(Vazirizadeh et al, 2016). 포집대에서 가스가 있으면 펄프의 유효 체류 시간이 짧아지게 되므로 높은 가스홀드업은 오히려 광물의 회수에 부정적인 영향을 미치게 된다(Finch and Dobby, 1991).

가스 홀드업을 측정하는 방법은 수위차를 이용하는 방법, 압력차를 이용하는 방법 및 센서를 이용하여 측정하는 방법 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 첫 번째로 수위차를 이용하는 방법은 컬럼부선기 전체 구역에 대한 가스홀드업을 측정하는 방법으로 폭기된 액체의 수위에서 탈기된 액체의 수위 차이를 이용하여 측정하는 방법이다. 비교적 간단한 방법이지만 실제 폭기된 펄프의 부피를 구하기 힘들고 난류가 발생하는 지점에서의 오차에 제약이 있다. 두 번째로 압력차를 이용한 방법은 컬럼부선기 일부 구역의 가스홀드업을 측정하는 방법이며 가장 많이 사용되는 방법이다. 압력차를 이용한 가스홀드업의 측정은 펄프와 기포입자의 밀도가정 등 가스홀드업의 압력을 측정하기 위한 변수에서 발생하는 오차에 제약을 받게 된다. 마지막으로 센서를 이용하여 전기전도도 또는 컬럼내부를 3차원화하여 측정하는 방법이 있다. 그러나 이 방법의 경우 미세한 고체입자에 의한 센서의 잦은 고장에 따라 문제점이 있고 실제 산업용 규모에서 최장 2주까지 작동하였으나 장기간 운전에는 따른 측정은 보고되지 않았다(Vinnett et al, 2016).

Finch and Dobby, 1991.는 압력차이를 이용한 가스홀드업 측정 방법을 다시 두가지 방법으로 나누었다. Fig 2.2.2와 같이 (a)와 (b)로 나눌 수 있으며 (a)의 경우 원하는 위치의 압력차이를 통해 직접 구하는 방법이며 (b)의 경우 마노미터를 이용한 방법으로 마노미터의 높이차이를 통해 가스홀드업을 구할 수 있다.

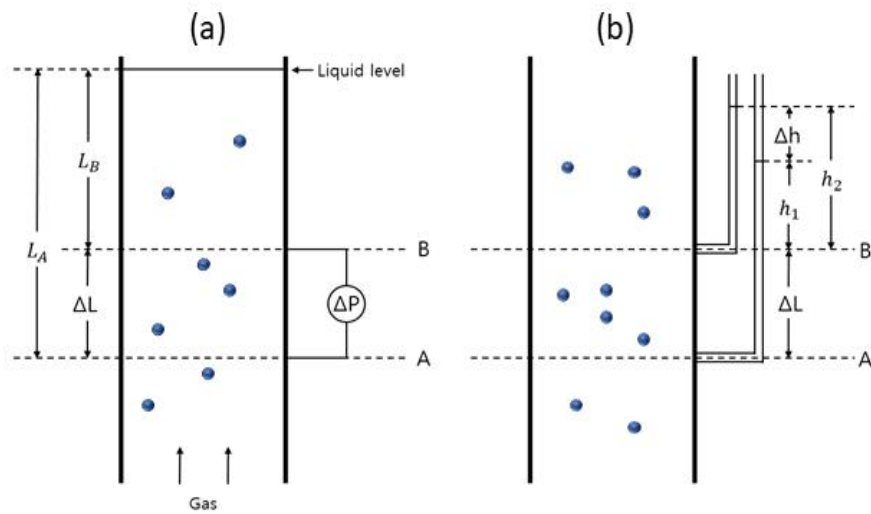


Fig 2.2.2. Measurement of gas holdup by pressure difference :
 (a) general, (b) using water manometer (Finch and Dobby, 1991)

Fig 2.3.2.의 (a)에서 A와 B의 압력은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_A = \rho_{sl}g L_A (1 - \epsilon_{gA}) \quad (\text{식 2.2.9a})$$

$$P_B = \rho_{sl}g L_B (1 - \epsilon_{gB}) \quad (\text{식 2.2.9b})$$

여기서 ρ_{sl} , g , L_A 및 $(1 - \epsilon_{gA})$ 는 각각 슬러리의 밀도, 중력가속도, 상부에서 A까지의 거리 및 가스가 없는 슬러리의 높이를 나타낸다. 이를 다시 두

점 A, B의 압력차로 정리하면

$$\Delta P = P_A - P_B = \rho_{sl}g\Delta L(1 - \epsilon_g) \quad (\text{식 2.2.10})$$

$$\epsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl}g\Delta L} \quad (\text{식 2.2.11})$$

와 같이 나타낼 수 있다. Fig 2.2.2의 (b)Fig처럼 마노미터를 이용한 경우는 A와 B에서의 압력을 다음과 같이 나타낼 수 있다(이때 마노미터의 내부는 물만 있다고 가정함).

$$P_A = \rho_w g(\Delta L + h_1)$$

$$P_B = \rho_w h_2$$

$$\Delta P = \rho_w g(\Delta L - \Delta h) \quad (\text{식 2.2.12})$$

여기서 포집대의 부피 밀도는 물의 부피밀도보다 작기 때문에 Δh 는 양수를 나타낸다. (a)에서 도출한 식에 ΔP 값을 넣어주면 식 2.2.1과 같이 정리할 수 있다.

$$\therefore \epsilon_g = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_{sl}} \left(1 - \frac{\Delta h}{\Delta L}\right) \quad (\text{식 2.2.13})$$

또한 기술의 발달에 의해 가스홀드업을 측정하는 새로운 방법들이 고안되었다. Gomez and Finch, 2007, 연구팀은 2개의 튜브를 이용하여 하나는 폭기된 슬러리의 전도도를 측정하고 다른 하나는 사이펀 작용을 유도하여 공기가 없는 슬러리의 전도도를 측정하여 가스홀드업을 측정하였다. 또한 장비의 발달에 따라 방사성 추적 기술을 이용하여 산업용 부선기의 가스홀드업을 측정하고 전기저항 단층 촬영을 통해 3D스캔 후 가스홀드업을 측정하였다. 그러나 이러한 방법은 준비시간이 길고 많은 인력이 필요하기 때문에 높은 비용 문제로 산업용으로 적용하여 사용하기에는 아직 적합하지 않다(Vinnett et al,

2016). 가스홀드업의 관측을 통해 컬럼내부의 기포크기 및 발생량을 예측하여 산업용 컬럼의 부선흡율 최적화를 위해서는 간편하고 정확한 측정방법이 고안되어야 할 필요가 있다.

기포표면적비

Fig 2.2.3은 컬럼내의 기포표면적비(Bubble surface area rate)를 도식화한 것으로 컬럼의 단면으로 잘랐을 때 기포가 차지하는 면적비를 나타낸다. 기포표면적이 커질수록 광물과의 접촉면이 증가되어 선별효율을 상승시킨다. 기포표면적비는 선별효율조절, 믹싱의 모델링 및 컬럼 스케일업에 활용할 수 있다.

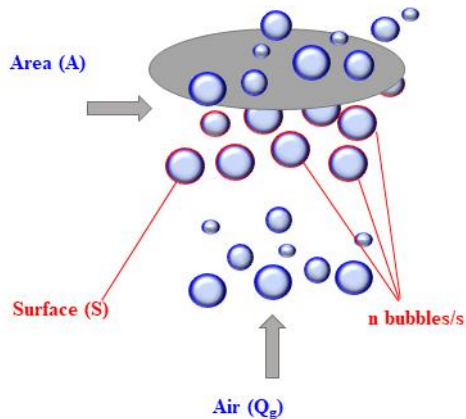


Fig 2.2.3. Schematic of bubble surface area rate (S_b).

즉, 컬럼내부의 가스분산특성인 가스속도(J_g), 기포크기(d_b), 가스홀드업(ϵ_g) 및 기포표면적비(S_b) 등은 부선흡율에 직접적인 영향을 미치는 주요 파라미터로써 이들의 예측 및 제어 연구는 컬럼부선의 효율을 좌우하기 때문에 기초 데이터 구축을 위한 연구가 수행되어야 한다.

제 3 절. 바이어스

일반부선과 컬럼부선에 있어서 가장 큰 차이점은 세척수의 여부에 있다. 컬럼부선에서 세척수의 역할은 두 가지로 나눌 수 있는데 바이어스를 제공하는 것과 기포층의 자연 배수로 정체된 고체입자의 회수가 가능하도록 세척대에 물을 제공하는 것이다. 컬럼부선에서 세척수는 세척대에서 정선의 기능에 밀접한 관련을 갖는다.

Fig 2.3.1은 세척대의 구조를 도식화한 것으로 포집대를 통과한 기포가 경계면(interface) 위로 첫 번째 기포층을 형성한다. 비교적 균질하고 작은 크기의 기포들은 빠르게 상승하는 기포에 의해 병합되어 커지며 정광으로 회수된다.

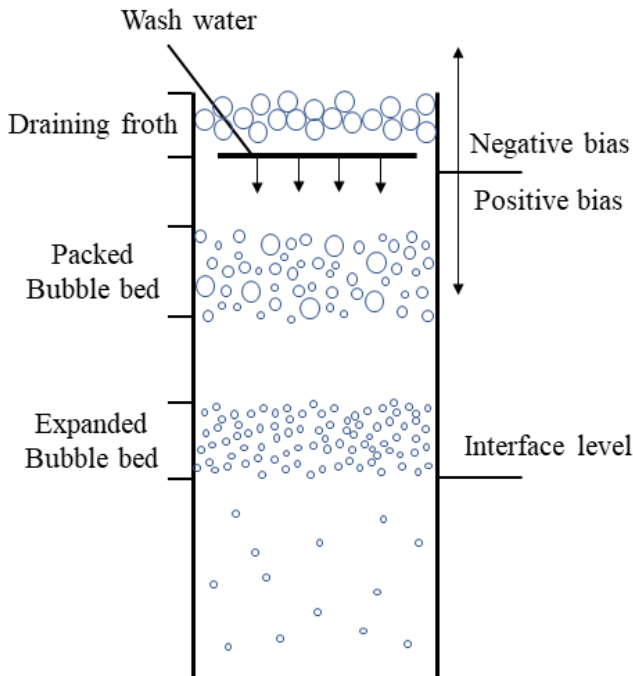


Fig 2.3.1. Structure froth suggested from 2-phase study (Yianatos et al., 1986b).

바이어스는 앞서 언급한 듯이 세척대에서 자연적으로 배출되는 물을 대체하여 기포의 안정성을 높여주는데 세척대의 깊이를 100cm이상 확장시킬 수 있다(Finch and Dobby, 1991). 바이어스는 세척수 및 가스 속도 변화를 통해 제어가 가능하며 특히 세척수가 바이어스에 많은 영향을 미치게 된다. 즉 세척수가 투입되면 일반부선에 비해 깊은 세척대를 만들어 선별효율을 더욱 증가시킬 수 있다.

Fig. 2.3.2.는 컬럼내 각 존(zone)들의 유체흐름과 속도의 관계를 도식한 것이다. 여기서 J_F 는 공급광액, J_{CS} 는 포집대에서 세척대로 유입되는 고체, J_B 는 하향하는 세척수, J_W 는 기포층을 채우는 상향하는 세척수, J_C 는 정광으로 배출 그리고 J_T 는 광미로 배출되는 속도이다. 컬럼내부의 유체 흐름의 물질수지(mass balance) 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Overall : } J_F + J_W &= J_C + J_T \\ \text{Cleaning zone: } J_W + J_{CS} &= J_B + J_C \\ \text{Collection zone: } J_F + J_B &= J_{CS} + J_T \end{aligned}$$

여기서 J_B 를 직접 측정 가능한 값으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_B = J_{CS} + J_T - J_F \quad (\text{식 2.2.14})$$

그리고 공급된 세척수가 분획하여 하향하는 세척수는 다음과 같다.

$$J_B = [Q_T (1 - \phi_{ST}) - Q_F (1 - \phi_{SF})] / A_c \quad (\text{식 2.2.15})$$

여기서 Q_T 및 Q_F 는 각각 광액공급유량 및 광미배출유량을 뜻하며 ϕ_{ST} 및 ϕ_{SF} 는 각각 광미 및 광액의 고체 부피분율을 나타낸다. 즉, 공급되는 광액의

농도와 배출되는 광미를 통해 하향하는 세척수 비율을 확인 할 수있다.

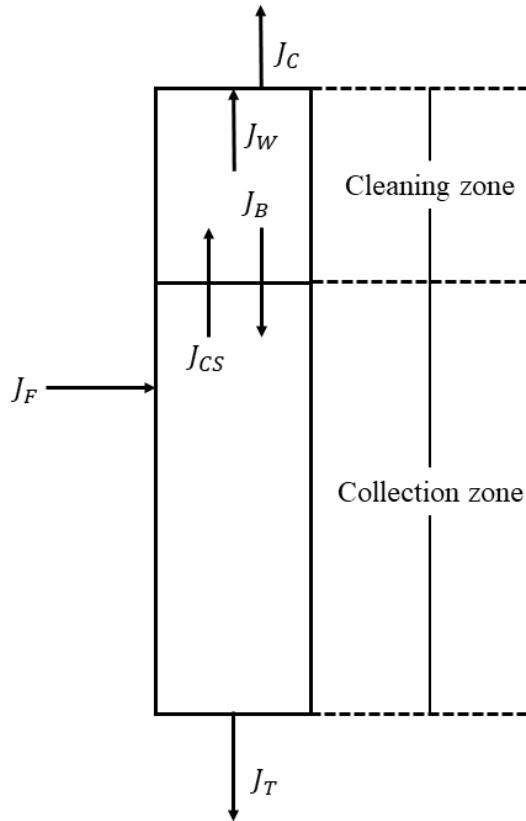


Fig 2.3.2. Volumetric flowrates in flotation column

제 3 장. 시료 및 실험 방법

제 1 절. 시료 특성

본 연구에 사용된 시료는 해남군 황산면 모이산 지역에서 채취된 함금 황화광으로 (주선시멘트(구 순신광산)로부터 입수하였다.

부유선별에 앞서 시료의 기초특성을 확인하기 위한 광물학적 특성조사를 수행하였으며 Fig 3.1.1.은 원광의 XRD 분석결과를 나타낸 것으로써, 주요 목적광물로는 금-은을 함유하고 있는 황철석(pyrite)이 그리고 맥석광물은 석영이 관찰되었다.

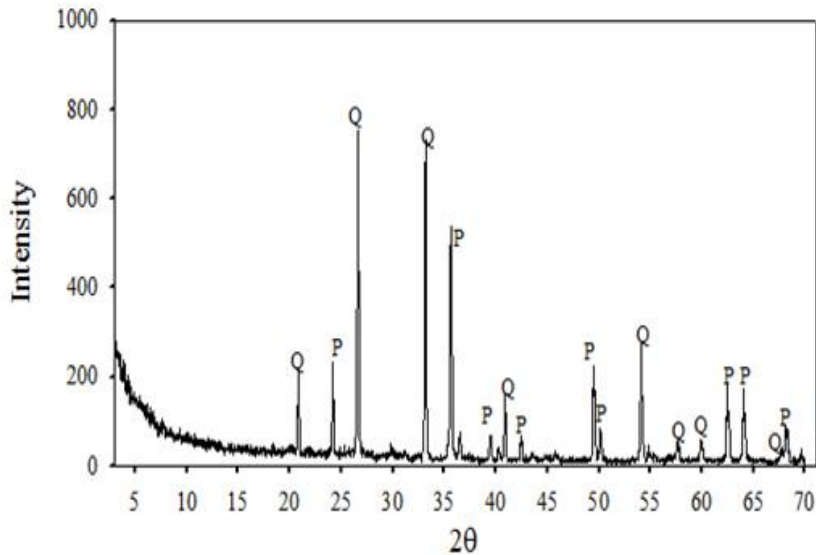


Fig 3.1.1. XRD analysis of raw sample (Q: Quartz, P: Pyrite)

Table 3.1.1.은 원광에 대한 XRF분석 결과로, SiO₂의 함량이 77.22%로 대부분 실리케이트 맥석광물이 주를 이루고 있으며 부선희율에 큰 영향을 줄 수 있는 그 외 황화광물들은 관찰되지 않았다.

Table 3.1.1. XRF analysis of raw sample

Component	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO
Wt.%	77.22	8.75	0.68	0.02	0.18	3.19
Component	Na₂O	K₂O	TiO₂	P₂O₅	LOI	SUM
Wt.%	0.52	8.02	0.02	0.04	1.36	100.00

Fig 3.1.2.는 원광의 SEM-EDS분석을 실시한 결과로 석영(Si 47.7%, O 52.3%) 및 황철석(S 61.41%, Fe 33.51%, Au 5.07%)을 확인 할 수 있었다. 대상 광물인 황철석에서 목적광물 Au가 약 5%로 부존된 것을 확인하였다.

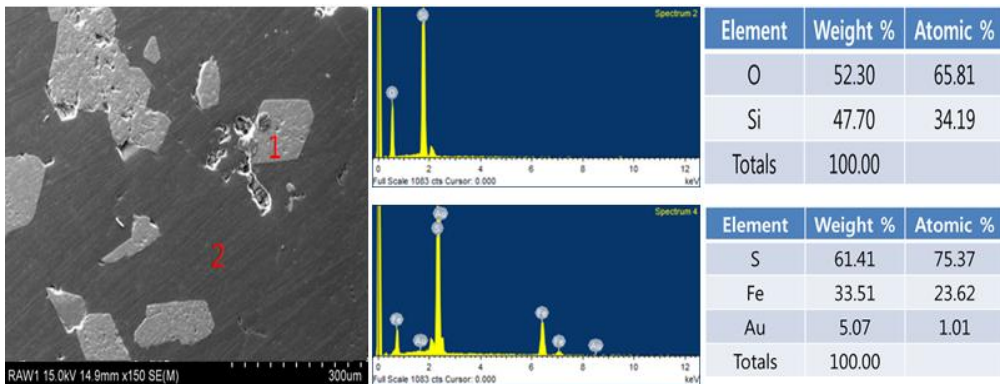


Fig 3.1.2. SEM & EDS analysis of raw sample (1: Pyrite, 2: Quartz)

목적광물인 금의 경우 황철석 내부에 미립으로 존재하기 때문에 선별을 위해서는 단체분리가 필요하다. Table 3.1.2.는 불밀을 이용하여 1차 과분쇄를 수행한 시료의 입도분석 결과를 나타낸 것으로 270mesh이하 산물이 약 57.46%을 나타내어 상당량이 미립자로 분포하는 것을 알 수 있다.

Table 3.1.2. Particle size analysis of raw sample (wet screen)

Size (Mesh)	weight (%)	Cum. Under size(%)	Cum, Over size(%)	Au(g/ton)
+60	0.61	100	0	1.51
-60+100	6.46	99.39	0.61	2.52
-100+140	12.08	92.93	7.07	2.53
-140+200	11.92	80.85	19.15	3.10
-200+270	11.47	68.93	31.07	3.71
-270+325	10.50	57.46	42.54	3.62
-325+400	5.50	46.96	53.04	8.88
-400+500	9.54	41.46	58.54	5.66
-500	31.92	31.92	68.08	2.87
Total	100	0	1000	4.21

Table 3.1.3.은 (주)천시멘트에서 생산된 일반부선 정광을 대상으로 입도분석한 결과를 나타낸 것으로, 평균 품위 Au 120g/ton의 정광을 생산하고 있으나 조업상황에 따라 Au 37~60g/ton의 저품위 정광이 생산되어 이들의 품위향상이 필요한 실정이다. 원광 및 정광의 입도분석 결과를 비교해보면 모두 미립자의 비율이 더 높은 것을 확인 할 수 있다. 또한 정광의 경우 미립자구간 (-270mesh)에서 품위가 더 높은 것을 확인했는데 이는 목적광물인 금의 단체분리도가 높아지기 때문으로 사료된다.

Table 3.1.3. Particle size analysis of low grade concentrate (wet screen)

Size (mesh)	weight (%)	Cum, under (Au Wt.%)	Cum, Over (Au Dist.%)	Au (g/t)
+100	14.32	100.00	0.00	31.37
-100+140	12.34	85.68	14.32	34.33
-140+200	13.37	73.34	26.66	48.59
-200+270	11.91	59.97	40.04	58.98
-270+325	8.02	48.05	51.95	81.62
-325	40.04	40.04	59.96	79.65
Total	100	0	100	60.68

제 2 절. 실험 방법

컬럼부선기

본 연구에서 실험실 규모의 포러스, 케비테이션 및 인라인믹서 세 가지 타입의 부선컬럼 장치가 이용되었다. Fig 3.2.1.은 포러스 타입 컬럼부선기로 다수의 공동이 기체가 통과하여 기포를 발생시킨다. 컬럼부선기의 총 높이는 3m로써 충분한 믹싱과 기포층을 형성하기 위해 높게 설정하였으며 컬럼의 내경은 7cm로써 내경이 커질수록 용량이 커지는 효과가 있지만 실험실규모의 기포발생장치를 이용하면 충분한 기포를 생성하고 상승시키기에 부족하여 상기와 같이 제작되었다. 본 컬럼부선기의 경우 가스홀드업을 측정하기 위해 마노미터를 설치하였으며 두 마노미터의 설치 간격은 35cm이다.



Fig 3.2.1 Lab-scale flotation column of porous type

Fig 3.2.2 및 3.2.3.은 각각 케비테이션 및 인라인믹서 타입으로써 공동현상과 믹서현상에 의해 기포를 발생시키는 장치를 가지고 있으며 그 외 장치의 제원은 포러스 타입과 동일한 규격을 가지고 있다.



Fig 3.2.2 Lab-scale flotation column of Cavitation type



Fig 3.2.3 Lab-scale flotation column of Inline-mixer type

가스분산특성

본 연구에서는 가스분산특성이 컬럼부선의 선별효율에 미치는 영향을 확인하기 위해 가스속도 및 바이어스 제어를 통해 2상(액-기) 및 3상(고-액-기)에서 가스홀드업 및 기포크기의 변화를 관찰하고 품위 및 회수율을 통한 컬럼내부의 가스분산특성을 조사하였다.

먼저 포집대의 가스분산특성을 파악하기 위해 기포의 크기를 측정 할 수 있는 시스템을 구축하였다. 상기 언급한 내용처럼 최근의 연구 동향은 포집대의 직접적인 관찰을 통해 기포크기를 측정하고 있다. 따라서 본 연구에서도 직접촬영을 위해 초고속 카메라를 사용하였다. Fig 3.2.4는 연구에 사용된 초고속 카메라로써 성능은 CMOS image sensor; 2048×1088 pixels을 가지고 있으며 최소 340fps - $1920 \times 1080p$ 부터 최대 2650fps - $1920 \times 120p$ 까지 촬영이 가능하다. 또한 fps가 높아질수록 명암이 어두워지기 때문에 추가적인 조명장치를 사용하였으며 조명장치를 통해 보다 기포의 명암을 높여 선명한 사진의 촬영이 가능했다. 이 때, 컬럼과 카메라 사이 거리를 일정하게 고정하여 항상 같은 크기의 이미지를 얻을 수 있도록 하였다. Fig 3.2.5. ZEISS 이미지 분석 프로그램으로 촬영된 사진으로부터 기포크기 측정에 사용하였다. 기포의 크기는 약 200여개 이상의 기포를 측정하였으며 평균값을 사용하였다.



Fig 3.2.4 High-speed camera set

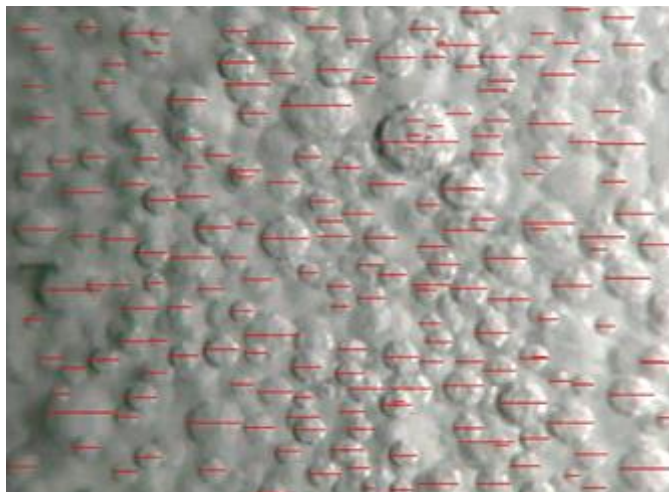


Fig 3.2.5 Photograph of bubble size measurement using ZEISS program

Fig 3.2.6.은 기포크기 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 먼저 조건조에서 기포제를 공급하고 가스속도 및 세척수의 조절 후 안정화 시간을 주었다. 이후 초고속 카메라를 이용하여 포집대의 촬영과 함께 정광 및 광미 배출량을 측정하였다. Table 3.2.1.은 액체와 기체 2상에서 기포제농도, 급광 속도, 가스 속도 및 세척수속도와 같은 가스분산특성의 주요 실험변수와 조건을 나타낸 것이다.

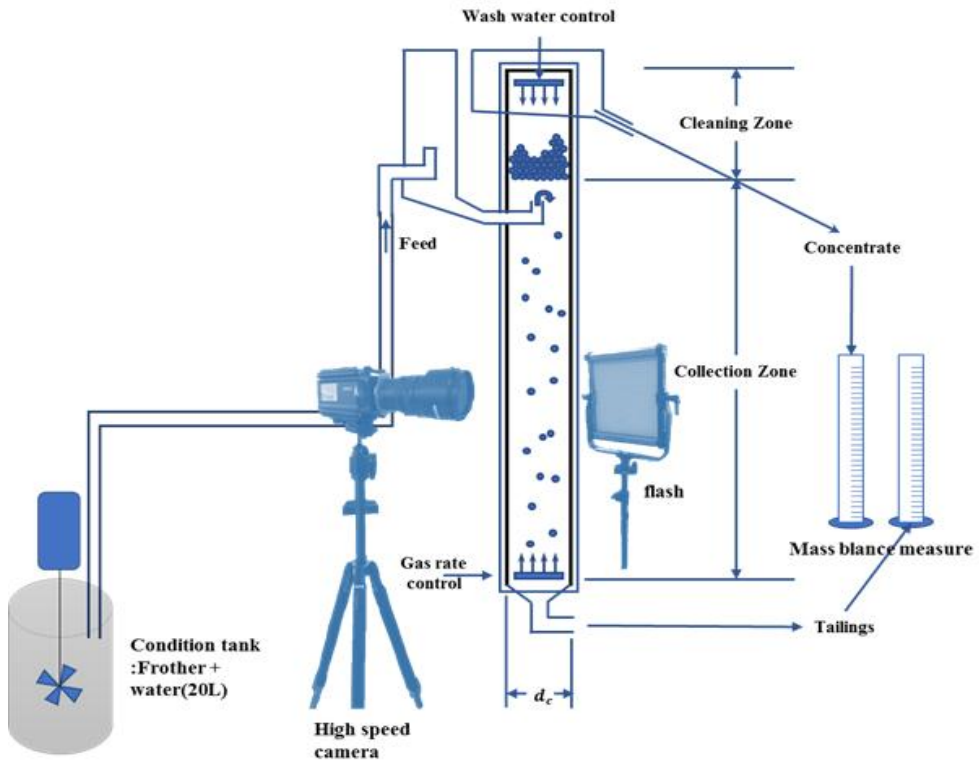


Fig 3.2.6. Bubble size measurement system

Table 3.2.1. Conditions of gas dispersion characteristics test (2phase)

Sparger	Air rate (cm/s)	Superficial wash water rate (cm/s)	frother (ppm)	feed (cm/s)
Porous	0.80~1.60	0.16~0.64	60~200	0.54
Cavitation	0.80~1.60	0.16~0.64	60~200	0.54
Inline mixer	0.80~1.60	0.16~0.64	60~200	0.54

상기 상술한 내용처럼 가스분산특성 확인을 위해 Masliyah의 간섭침강식과 Wallis의 표류유동이론(Drift flux)를 이용하여(Finch and Dobby, 1991) 상기 조건에서의 기포크기를 측정하였으며 각 변수들과의 상관관계를 확인했다.

Fig 3.2.7은 합금황화광의 컬럼부선 공정도로 광액이 투입된 3상에서의 부선기초특성 파악을 위한 연구를 수행했다. 실험방법은 대체로 2상과 유사한 방법이나 광액이 투입되었다.

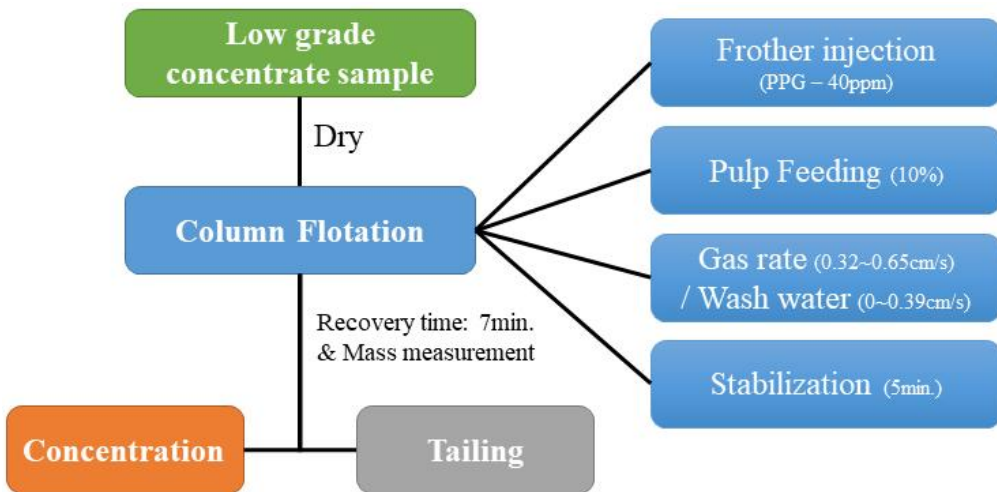


Fig 3.2.7. Schematic of column flotation process in 3 phase (S-L-G)

제 4 장. 결과 및 토의

제 1 절. 2상(액-기)의 컬럼부선 기초특성

1. 기포제 종류에 따른 가스분산특성

기포제의 종류가 기포의 형성 및 크기에 미치는 영향을 확인하기 위해 기포제의 종류 및 농도에 따른 표면장력을 측정하였다. Fig 4.1.1.는 기포제의 농도에 따른 표면장력 변화의 결과로써 기포제의 농도가 증가할수록 표면장력이 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며 기포제의 농도가 일정 농도 이상으로 증가함에 따라 표면장력의 감소폭이 낮아지는 것을 확인하였다.

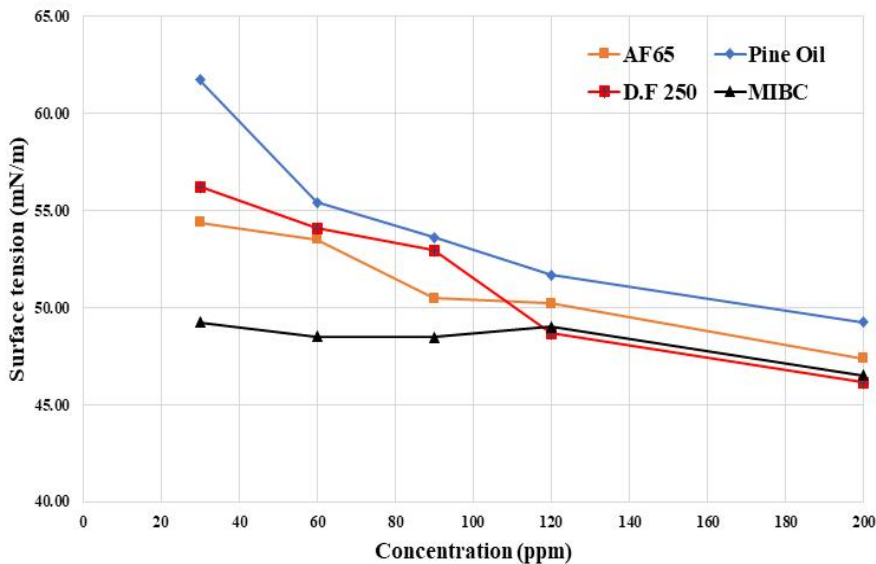


Fig 4.1.1. Comparison of surface tension by frother types

본 연구는 표면장력의 변화 폭이 가장 큰 파인오일(Pine Oil)를 선정하여 수행하였다. Fig 4.1.2.는 기포제의 농도에 따른 기포크기를 나타낸 것으로 컬럼의 타입과는 무관하게 기포제의 농도가 증가할수록 기포의 크기가 감소하는 것을 확인하였다.

기포제는 계면활성제로 물의 표면장력을 낮추게 되고 표면장력이 낮아진 물의 상호간 인력이 감소하여 더 작은 기포를 형성하는 것으로 판단된다. 기포의 크기는 평균적으로 약 0.6~0.7mm사이에 분포하는 것을 확인하였으며 점차적으로 기포제의 농도가 증가하더라도 기포크기의 감소폭이 줄어드는 것을 확인하였다. 즉, 기포제가 일정농도 이상에서는 표면장력의 감소폭이 감소한 것처럼 표면장력과 기포크기 사이에 비례관계가 있는 것을 확인하였다.

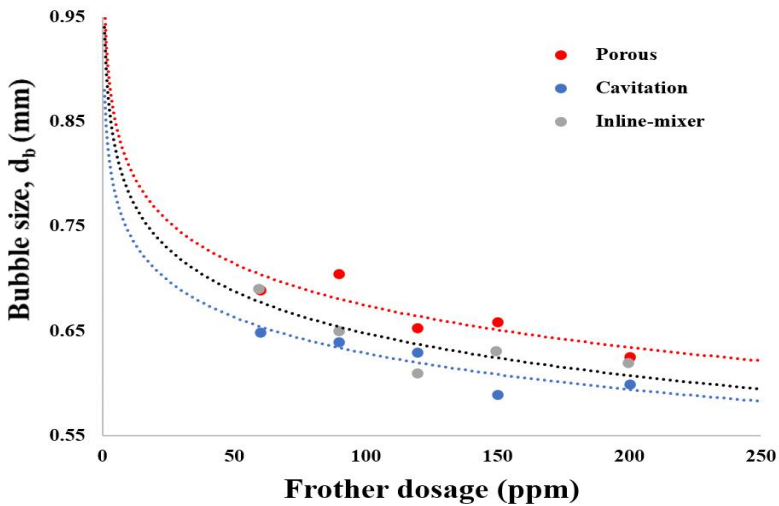


Fig 4.1.2. Effect of frother (pine oil) dosage on bubble size ($J_g = 0.93\text{cm/s}$)

2. 기포발생장치 별 가스분산특성

컬럼부선의 효율을 결정하는 요소 중 가스속도는 컬럼내부 흐름을 결정하는 요인이 된다. 컬럼내의 가스속도가 빨라지게 되면 난류가 형성이 되며 기포의 크기가 불균일하게 되는 요인이 된다. 반대로 가스속도가 느려지면 층류가 형성되고 균일한 크기의 기포가 형성된다.

포러스타입

포러스 타입의 기포발생장치를 사용하여 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s에서 세척수에 따른 가스홀드업의 변화를 비교하였다. Fig 4.1.3.은 가스속도 및 세척수에 따른 가스홀드업의 변화를 나타내었으며 가스속도가 증가하면 가스홀드업이 증가하고 세척수가 증가하면 감소하는 것을 확인하였다. 이는 세척수(J_L)가 컬럼내에 물의 공급량을 증가시켜 가스홀드업이 감소하는 것으로 판단된다.

포러스 타입의 경우 넓은 범위의 기포가 발생하여 상대적으로 내부에 난류발생하기 때문에 비교적 균일한 크기의 기포형성이 가능한 기술개발이 요구된다. 또한 가스속도의 증가는 상승속도가 빠른 큰 기포를 형성하기 때문에 가스홀드업의 증가폭을 감소시키는 것으로 판단된다. 가스홀드업의 경우 가스속도 1.08cm/s 이상 세척수속도 0.69cm/s 이하의 범위에서 최대 50%이상 까지 상승하였다. 그 이상의 높은 가스홀드업은 난류 발생을 가속화시켜 준의 체계가 불안정해지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 포러스 타입은 다른 타입에 비해 가스속도의 증가, 즉 포집대 내의 가스의 양을 증가시켜 가스홀드업을 보다 높이는 것으로 판단된다.

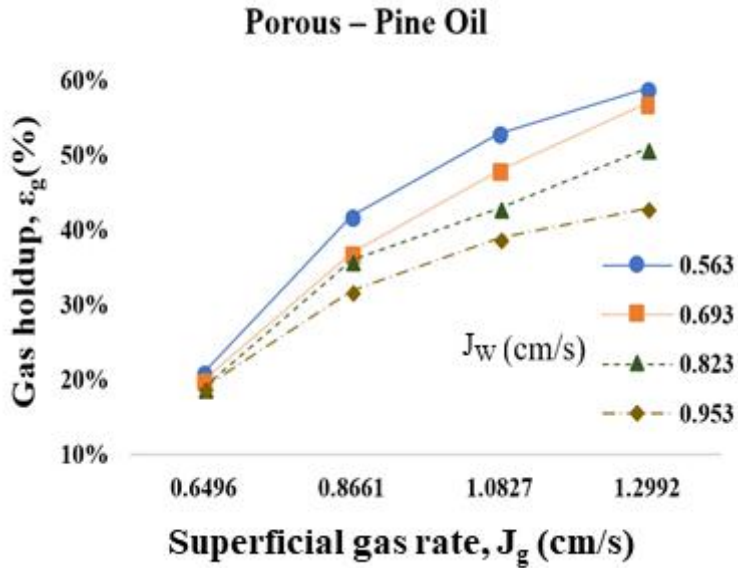


Fig 4.1.3. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in porous type

Fig 4.1.4.는 포러스 타입의 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s에서 기포제 농도에 따른 가스홀드업의 변화를 비교한 결과를 나타내었다. 기포제농도에 따른 영향은 60~120ppm범위에서 기포제의 농도가 증가함에 따라서 가스홀드업이 비례하는 것을 확인하였다. 그러나 그 이상의 범위에서는 가스홀드업이 감소하는데 이는 기포제농도가 낮은 범위에서 농도가 증가함에 따라 기포크기가 감소되고 컬럼내 기포체류시간을 증가시키는 것으로 판단되며 그 이상의 농도에서는 기포크기의 변화보다 기포상태의 안정화에 따른 것으로 판단된다. 특히 150~200ppm의 값이 유사한 것으로 보아 기포제 농도의 한계점인 것으로 판단된다.

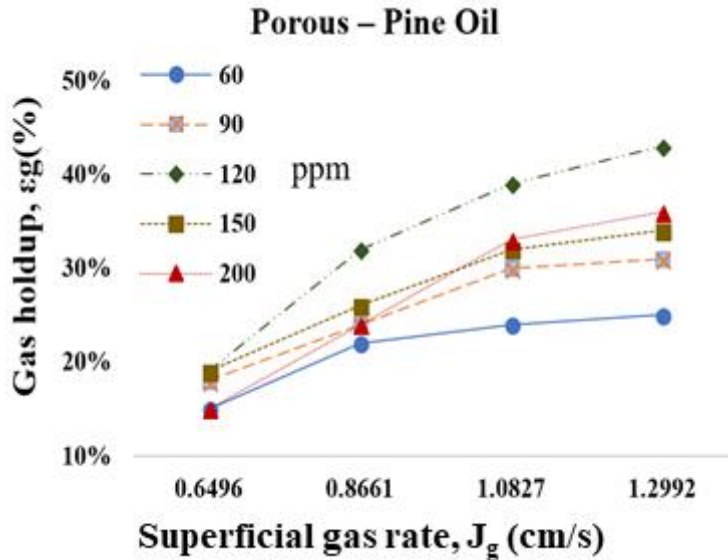


Fig 4.1.4. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in porous type

케비테이션타입

케비테이션 타입에서 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s 세척수속도에 따른 가스홀드업의 변화를 비교하였다. Fig 4.1.5.은 가스속도 및 세척수에 따른 가스홀드업의 변화를 나타내었다. 가스 속도의 증가에 따라 가스홀드업은 감소하였으며 포러스타입과는 상반된 결과를 보여주었다. 이는 케비테이션타입의 기포발생 원리 차이에 따른 것으로 판단된다. 케비테이션타입의 경우 유체가 좁은 목을 통과하며 공동현상에 의해 기포가 발생되는데 이때 가스속도가 빠르게 되면 좁은 목을 지나는 유체의 압력차가 감소해 공동현상이 약해지고 더 큰 기포가 형성되며 큰 기포는 상대적으로 상승속도가 빨라 가스홀드업이 감소하는 것으로 생각된다. 또한 세척수가 증가하면 가스홀드업이 증가하는

데, 이는 상승하는 기포가 하강하는 세척수(J_L)의 저항을 받아 기포의 체류시간을 증가시키기 때문으로 판단된다.

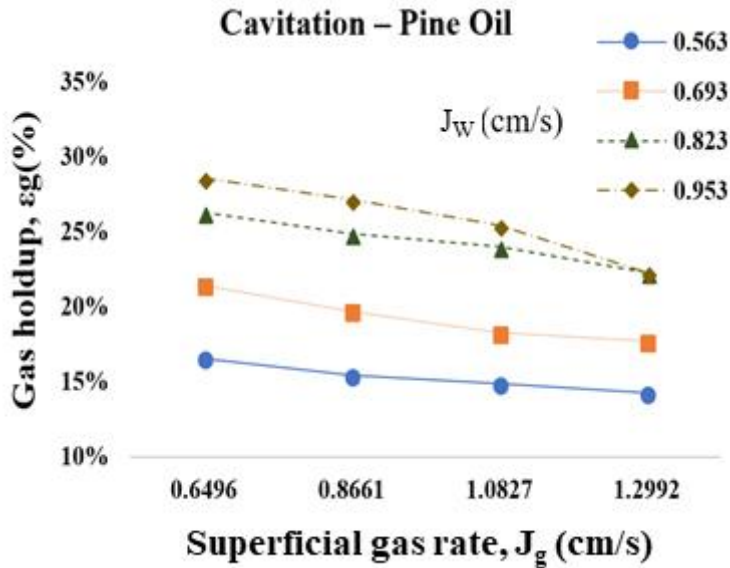


Fig 4.1.5. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in cavitation type

Fig 4.1.6.은 케비테이션 타입의 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s에서 기포제 농도에 따른 가스홀드업의 변화를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 가스속도의 증가에 따라 가스홀드업이 소폭 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 케비테이션 타입의 경우 가스 속도의 증가에 따라 상향류 속도도 증가되어 기포의 체류시간 짧아져 홀드업이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 기포제농도가 증가하면 가스홀드업이 증가하는데 포러스타입과 유사하게 기포제농도가 증가하면 표면장력이 감소하고 작은기포가 형성되어 체류시간이 증가하여 가스홀드업이 증가하는 것으로 판단된다.

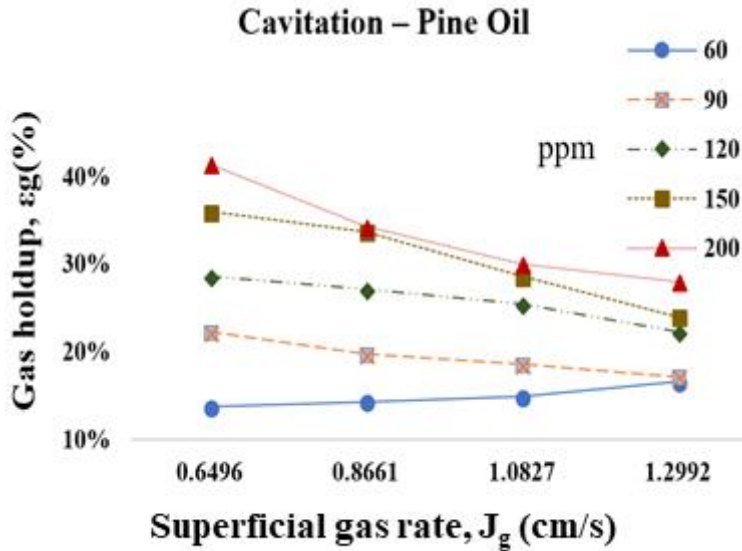


Fig 4.1.6. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in Cavitation type

인라인믹서타입

인라인믹서 타입에서 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s 세척수속도에 따른 가스홀드업의 변화를 비교하였다. Fig 4.1.7.은 가스속도 및 세척수에 따른 가스홀드업의 변화를 나타내었다. 가스속도가 증가에 따른 가스홀드업의 변화폭이 낮은 것으로 확인된다. 이는 가스속도가 증가해도 믹서에 의해 일정한 크기의 기포가 형성되어 가스홀드업에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다. 세척수의 영향은 케비테이션타입과 유사하게 세척수의 속도가 증가하면 가스홀드업이 증가하는 것을 확인하였는데 세척수가 기포의 상승류를 억제하여 기포체류시간의 증가에 따른 것으로 판단된다.

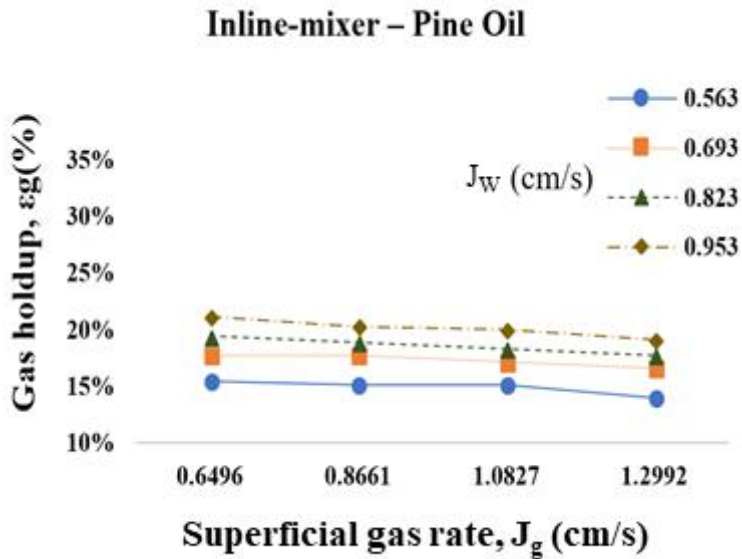


Fig 4.1.7. Gas holdup versus superficial gas rate and superficial wash water rate in Inline-mixer type

Fig 4.1.8.의 그래프는 인라인믹서타입의 기포발생장치를 사용하여 가스속도 구간 0.8~1.6cm/s에서 기포제 농도에 따른 가스홀드업의 변화를 비교한 결과이다. 인라인믹서타입에서 기포제농도가 증가하면 가스홀드업이 증가하는 것을 확인하였는데 이는 다른 기포발생장치와 같이 기포제의 역할에 의해 표면장력이 감소하여 상대적으로 작은 기포가 형성되기 때문으로 판단된다.

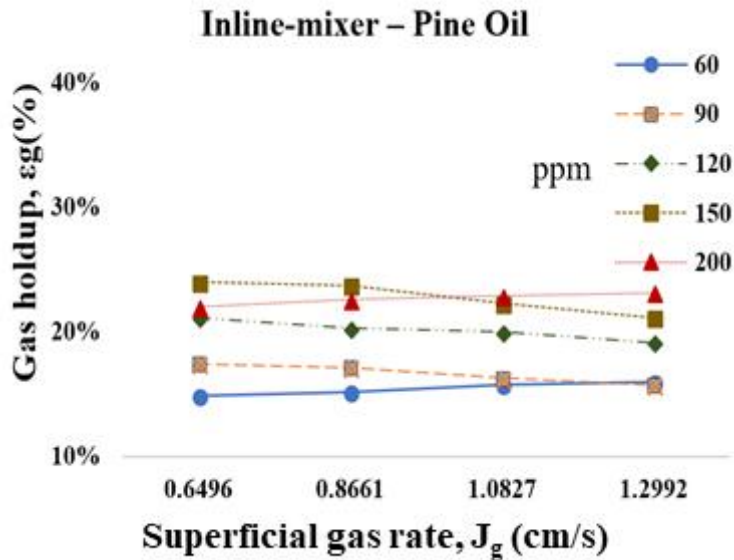


Fig 4.1.8. Gas holdup versus superficial gas rate and frother dosage in Inline-mixer type

Fig 4.1.9.~11.은 포러스타입, 케비테이션 및 인라인믹서타입별 기포크기 측정 및 산정 값을 관계식으로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 포러스타입, 케비테이션 및 인라인믹서타입별 기포의 평균 크기는 각각 0.718mm, 0.613mm 그리고 0.630mm로써 케비테이션타입에서 가장 작은 기포가 형성되는 것을 확인 할 수 있었다. 즉 세 가지 타입의 기포발생장치를 비교하면 케비테이션 타입에서 가장 작은 기포를 형성하며 모두 $\pm 20\%$ 이내의 오차범위의 결과를 확인 할 수 있었는데 Yianatos et al., 1988; Markus Lichti, 2018 또한 비슷한 오차범위의 결과를 나타내었다. 이는 기포의 형성에 미치는 물리적 영향들이 많아 동일한 조건에서도 동일한 크기의 기포형성에 제약이 있다.

기포크기의 분산도를 보게 되면 포러스타입이 다른 기포발생장치와 비교

하여 분산도가 높은 것을 확인 할 수 있는데 이는 공동의 크기가 일정하지
 않아 넓은 범위의 기포가 발생되는 것으로 판단되며 인라인믹서타입의 경우
 매우 낮은 분산도를 나타내는 것으로 보아 비교적 균일한 기포가 형성되는
 것으로 판단된다.

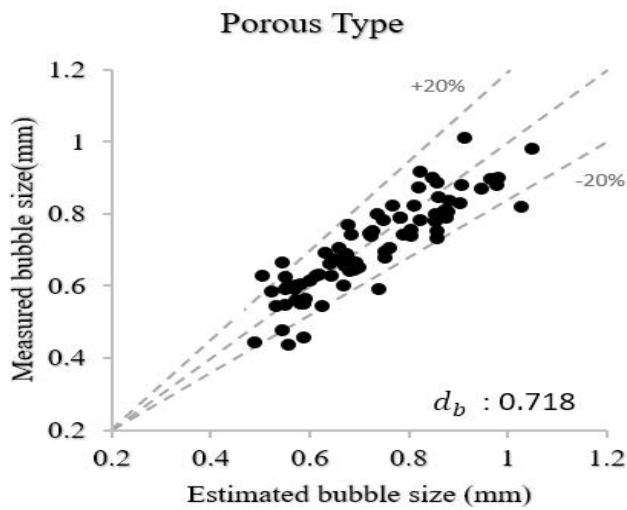


Fig 4.1.9. Comparison of measured and estimated bubble size in porous type
 column

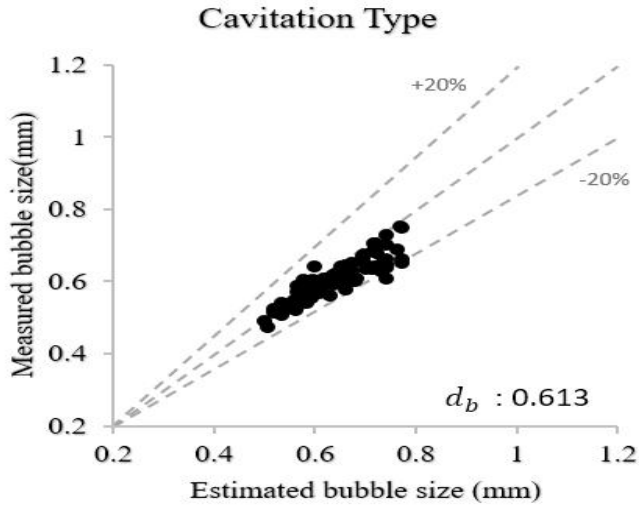


Fig 4.1.10. Comparison of measured and estimated bubble size in Cavitation type column

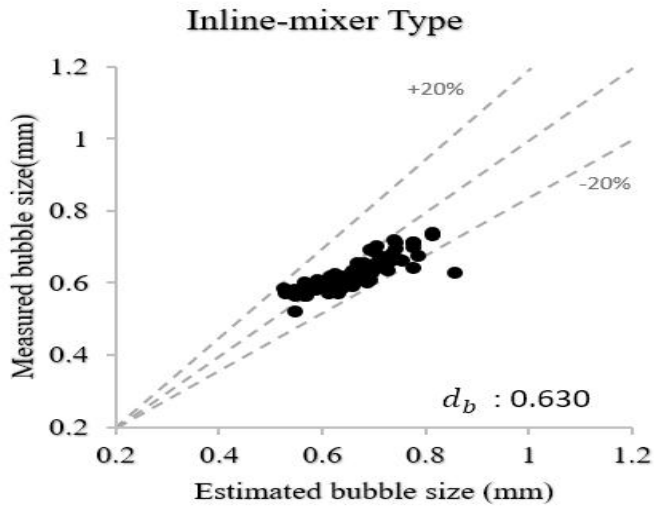


Fig 4.1.11. Comparison of measured and estimated bubble size in Inline-mixer type column

제 2 절. 3상(고-액-기)의 컬럼부선 효율제어

예비실험

2상에서의 실험조건으로 (주)썬시멘트의 함금황화광물을 이용한 컬럼부선 예비실험을 진행하였다. Fig 4.2.1.은 황화광물이 첨가된 3상에서 가스속도의 변화에 따른 품위 및 회수율을 나타낸 것으로, 포러스타입 컬럼이용하여 기포제 PPG(40ppm), 기포제 투입속도 0.54cm/s, 광액10%, 급광량 0.27cm/s 및 세척수속도 0.69cm/s의 조건에서 수행되었다.

실험결과, 가스속도가 증가함에 따라 품위는 감소하고 회수율은 증가하는데 이와 같은 가스속도 증가에 따른 품위의 감소 이유는 앞선 2상에서 가스분산특성 연구에서 확인된 바와 같이, 가스속도의 증가는 기포의 크기 및 상승 속도를 증가시켜 기포의 체류시간이 짧아지기 때문에 기포와 입자의 충분한 충돌, 부착 및 탈착이 이루어지지 않아 품위가 감소하는 것으로 판단된다. 이와 같이 강한 상승류로 인해 입자들의 부유량이 많아져 품위가 감소하고 회수율이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig 4.2.2.는 3상에서 세척수의 변화에 따른 품위 및 회수율을 나타낸 것으로 포러스타입 컬럼을 이용하여 기포제 PPG(40ppm), 기포제 투입속도 0.54cm/s, 광액10%, 급광량 0.27cm/s 및 가스속도 0.65cm/s의 조건에서 수행되었다.

실험결과, 가스속도에 따른 변화와 비슷한 결과를 나타내었으며 세척수가 증가하면서 컬럼내부에 강한 난류가 발생되고 기포들의 병합으로 선택성이 저하되어 품위가 저하되는 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 시료는 목적 광물의 대부분이 미립자 형태로 심한 난류 및 큰 기포는 미립자의 부착에 제약이 있어 품위가 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 강한 상향류가 많은 양의 시료를 부상시켜 회수율은 최대 87%까지로 확인이 되었다.

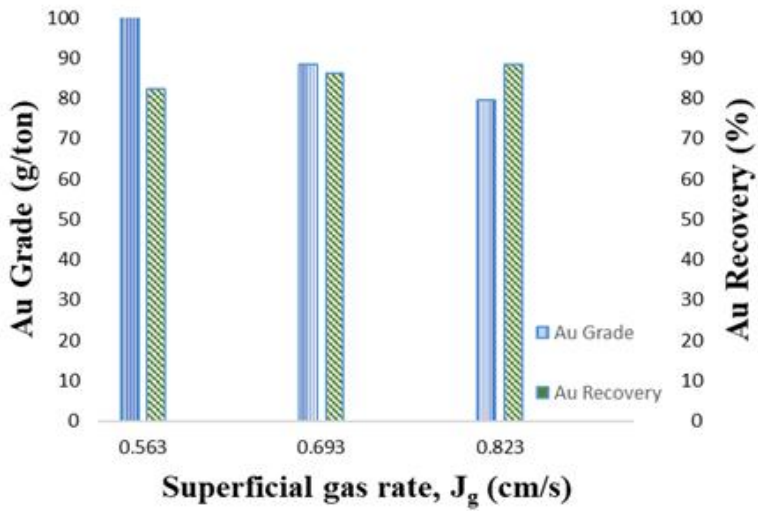


Fig 4.2.1. Effect of superficial gas rate on grade and recovery of gold in preliminary tests

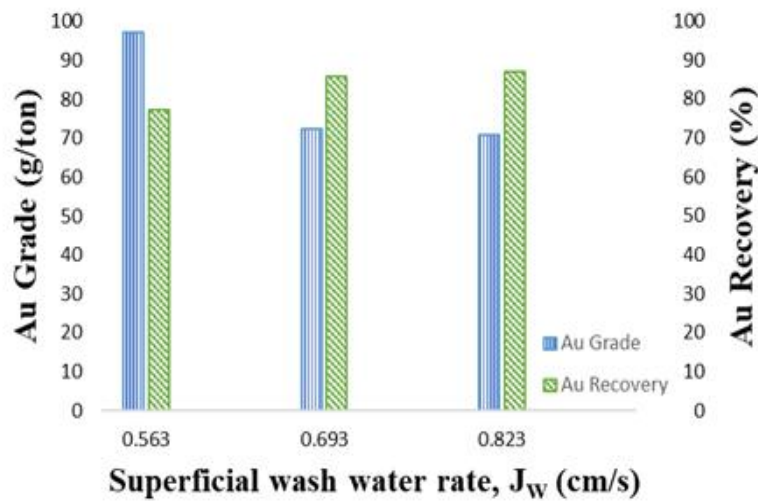


Fig 4.2.2. Effect of superficial wash water rate on grade and recovery of gold in preliminary tests

3상에서 가스분산특성

예비실험조건은 가스속도 및 세척수에 따른 선별효율에 차이가 적어 본 실험에서 상대적으로 폼위 및 회수율이 높았던 구간에서 실험을 진행하였다. 실험 조건은 가스속도 0.32~0.65cm/s 및 세척수속도 0~0.39cm/s의 범위에었으며 가스속도가 0.32cm/s보다 낮은 조건에서는 기포형성 및 정광 배출이 되지 않아 그 이상의 조건에서 물질수지 및 광미배출을 조절하였다.

3상의 가스분산특성은 광물의 영향을 받기 때문에 가스속도 및 세척수의 제어를 통한 가스분산특성과 운송율, 바이어스 및 물 회수율을 평가하였다.

Fig 4.2.3. 및 4.2.4.는 3상에서 가스속도에 따른 가스홀드업 및 기포크기 관계를 나타낸 것으로, 가스속도 증가에 따라 기포크기 및 가스홀드업이 증가하게 되는데, Fig 4.2.5.에서 보는 바와 같이 가스속도가 증가할 때 포집대 내에서 물과 기포가 공존시 기포의 크기가 커지며 차지하는 면적이 증가하게 되고 특정 영역에서 가스가 차지하는 비율이 증가하게 된다.

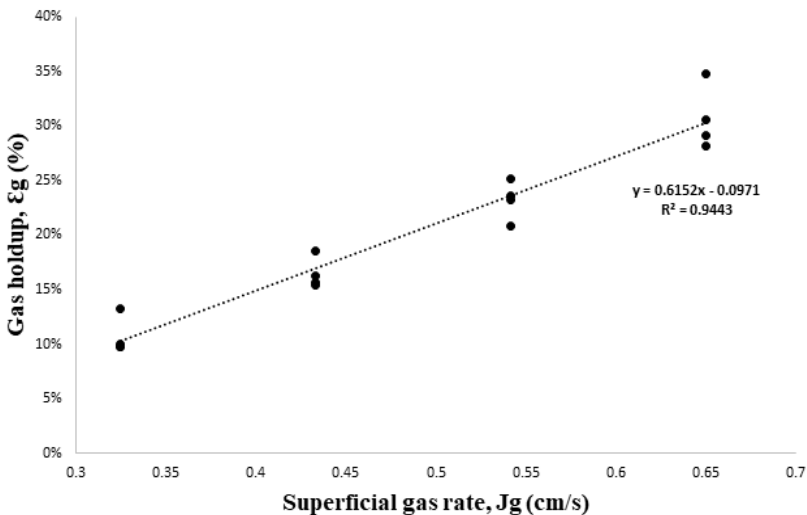


Fig 4.2.3. Relationship of superficial gas rate (J_g) and gas holdup (ϵ_g)

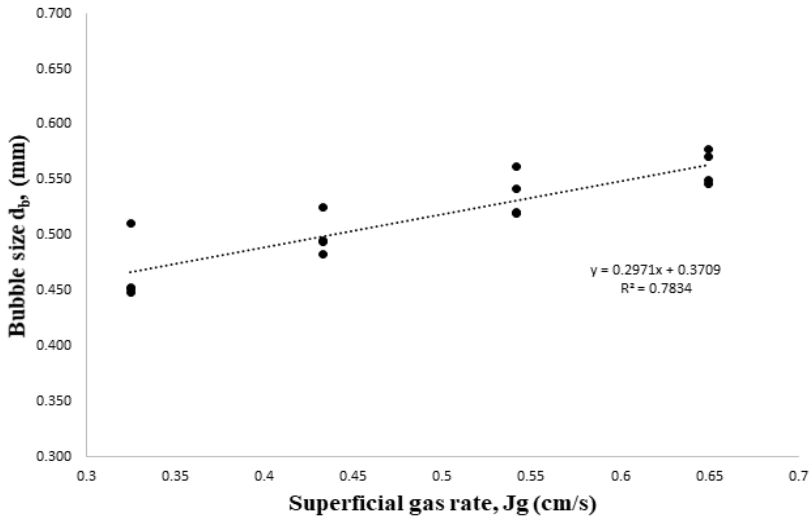


Fig 4.2.4. Relationship of superficial gas rate (J_g) and bubble size (d_b)

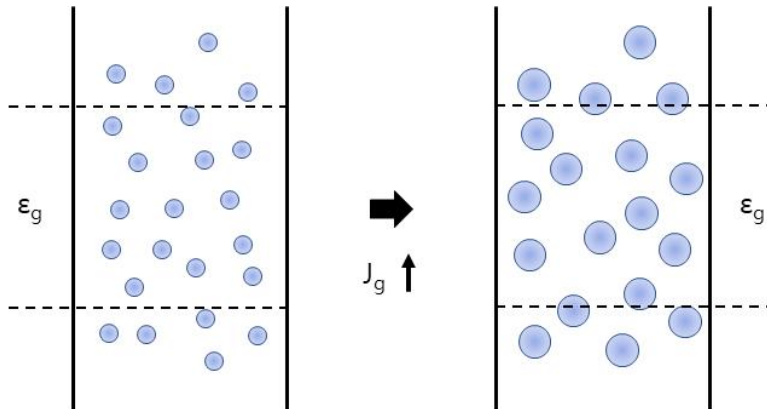


Fig 4.2.5. Change of Bubble size with increasing superficial gas rate

Fig 4.2.6.은 가스홀드업 및 기포크기의 관계를 비교한 그래프로써 서로 비례관계에 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 가스속도에 따른 기포크기와 가스홀드업 사이에도 상관관계가 있음을 확인 할 수 있었는데 기포발생장치를 통해 일정한 크기의 기포생성이 가능하다면 가스홀드업의 제어가 가능할

것으로 판단된다.

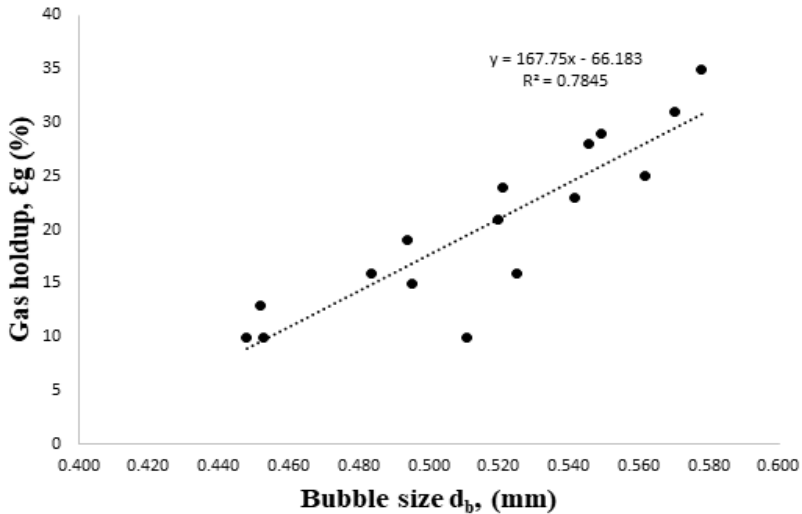


Fig 4.2.6. Relationship of Bubble size (d_b) and Gas holdup (ϵ_g)

Fig 4.2.7.은 가스홀드업에 따른 겉보기 기포표면적비의 관계를 나타낸 것이다. 가스홀드업이 증가하면 기포표면적비가 증가하는데 이는 기포표면적비는 기포크기와 관련이 있으며 가스홀드업이 기포크기에 따라 변하기 때문에 가스홀드업과 기포표면적비가 비례관계인 것을 확인하였다. 즉, 가스속도의 증가는 가스홀드업, 기포크기 및 겉보기 기포표면적비를 증가시키는 관계를 가지고 있고 이들의 제어를 통해 선별효율을 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

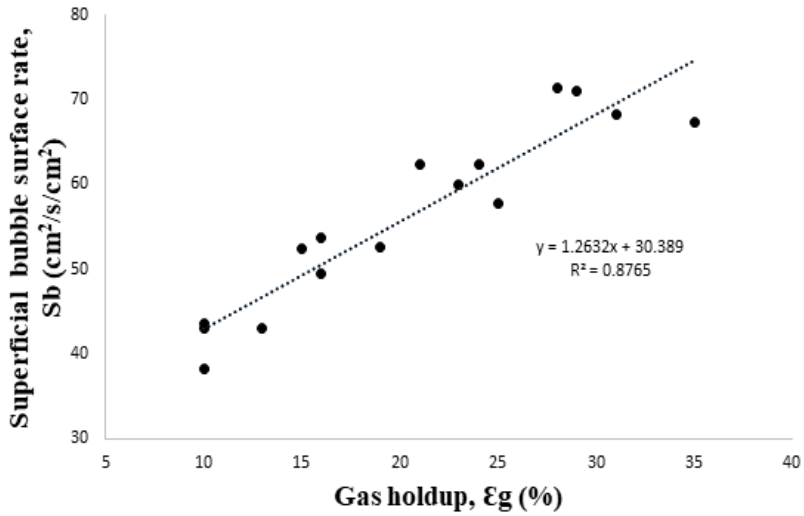


Fig 4.2.7. Relationship of gas holdup (ϵ_g) and Superficial bubble surface rate (S_b)

운송율 및 바이어스

Fig 4.2.8. 및 Fig 4.2.9.는 가스속도 및 가스홀드업과 운송율 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 가스속도 및 가스홀드업이 증가하면 운송율이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 기포크기 및 개수와 관련된 기포표면비가 증가하여 포집대 내에서 시료의 운송율이 증가하고 따라서 가스속도가 증가할 때 회수율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 운송율에서 맥석광물이 미치는 영향도 고려되어야 하며 가스속도 외에 광액농도, 세척수속도, 바이어스 및 물 회수율과 등과 같은 외부요인에 의해 회수율이 달라질 수 있다.

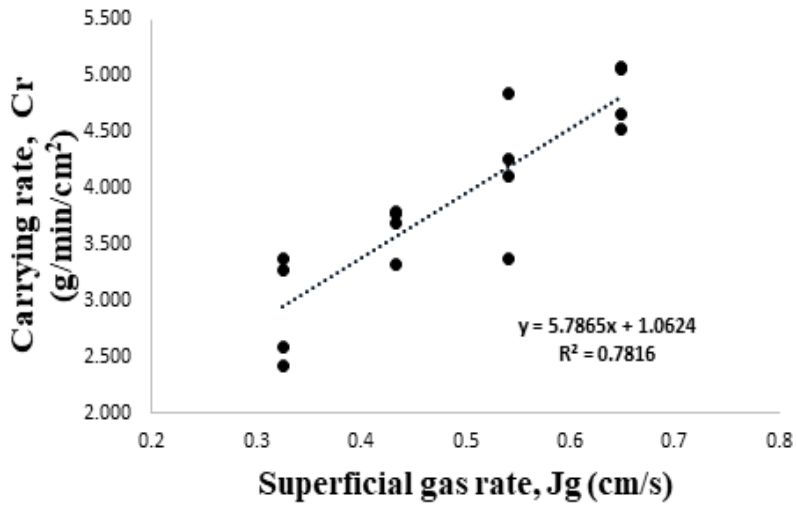


Fig 4.2.8. Relationship of superficial gas rate (J_g) and carrying rate (Cr)

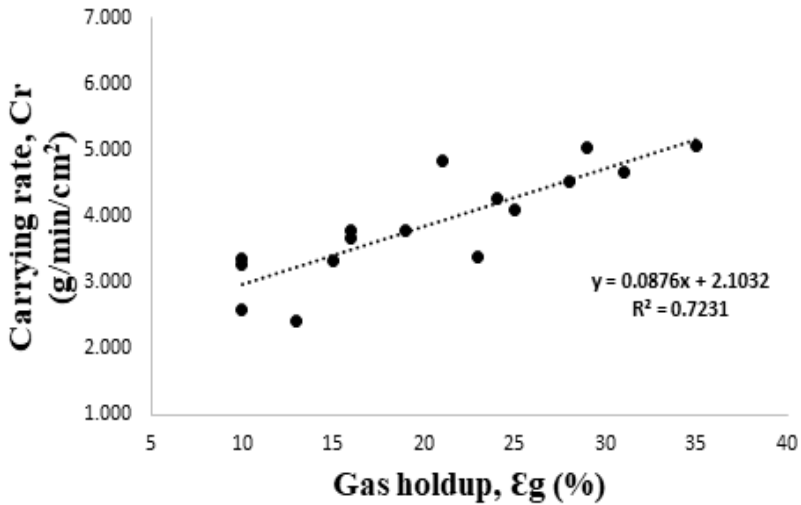


Fig 4.2.9. Relationship of Gas holdup (ϵ_g) and Carrying rate (Cr)

가스속도가 세척대에 미치는 영향을 확인하기 위해서 바이어스 및 물회수율과의 관계조사가 수행되었다. 세척대는 포집대에서 상승한 기포와 세척수의 영향을 받는데 가스속도가 증가하면서 공급되는 기포의 양이 증가하게 되고 세척수속도가 증가하면 공급되는 물의 양이 증가하게 된다. 이 때, 세척수는 양의 바이어스와 음의 바이어스로 나뉘게 되는데 양의 바이어스는 정체된 광물이 회수 될 수 있도록 기포층에 물을 공급하여 깊이가 확장되고 흡기현상을 감소시켜 안정화된다. 이에 본 연구에서는 세척대에서 가스속도와 세척수속도 사이의 관계를 조사하였다.

Fig 4.2.10.은 가스속도에 따른 바이어스의 변화를 나타낸 것으로 가스속도가 증가할 때 바이어스가 감소하는 것을 알 수 있는데 가스속도가 증가하면 세척대에 공급되는 기포량이 많아지고 상향류가 강해져 상대적으로 바이어스를 역류시키기 때문으로 판단된다. 이는 결국 바이어스의 역할인 세척작용이 감소하여 품위는 감소하나 회수율은 증가할 것으로 판단된다.

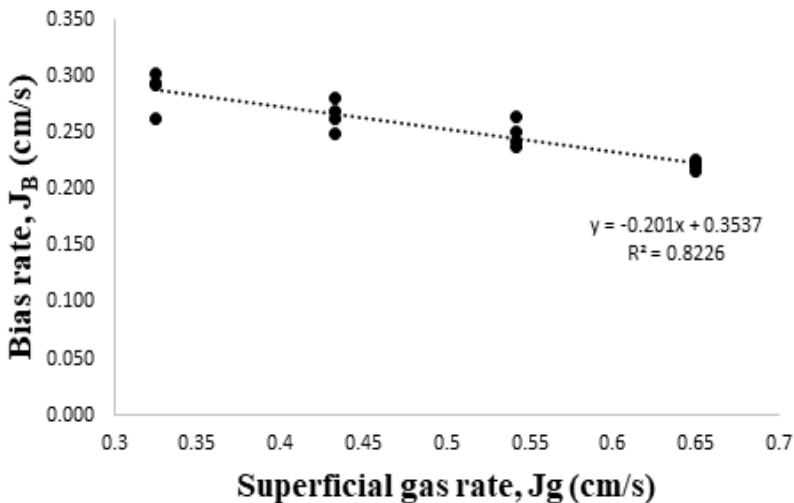


Fig 4.2.10. Relationship of superficial gas rate (J_g) and Bias rate (J_B)

Fig 4.2.11.은 가스홀드업에 따른 바이어스 변화를 나타낸 것으로 가스홀드업이 증가하면 바이어스가 감소하게 된다. 가스속도와 가스홀드업은 비례관계를 가지고 있어 상기 가스속도에 따른 바이어스관계와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

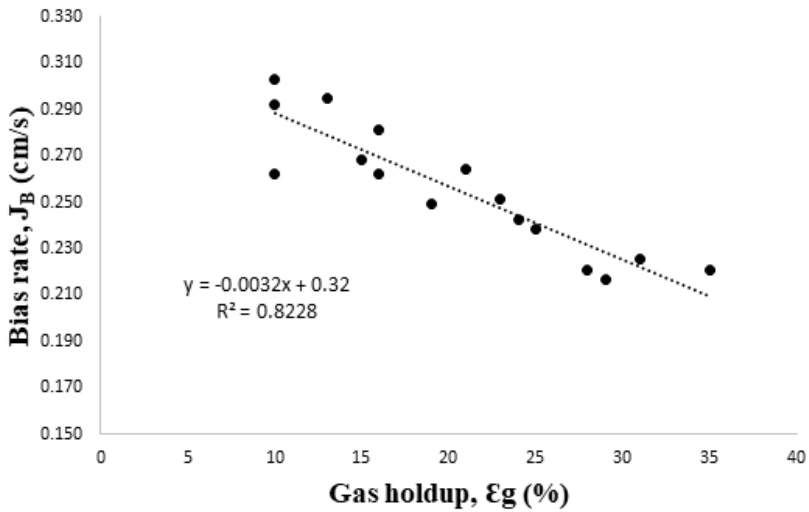


Fig 4.2.11. Relationship of gas holdup (ϵ_g) and bias rate (J_B)

Fig 4.2.12는 세척수속도에 따른 물 회수율 변화를 비교하여 나타내었는데 세척수속도가 증가할 때 물 회수율도 증가하였다. 이는 세척수속도가 증가하면 세척대에서 배수되는 물이 많아지고 경계면의 수위가 상승하기 때문으로 판단된다.

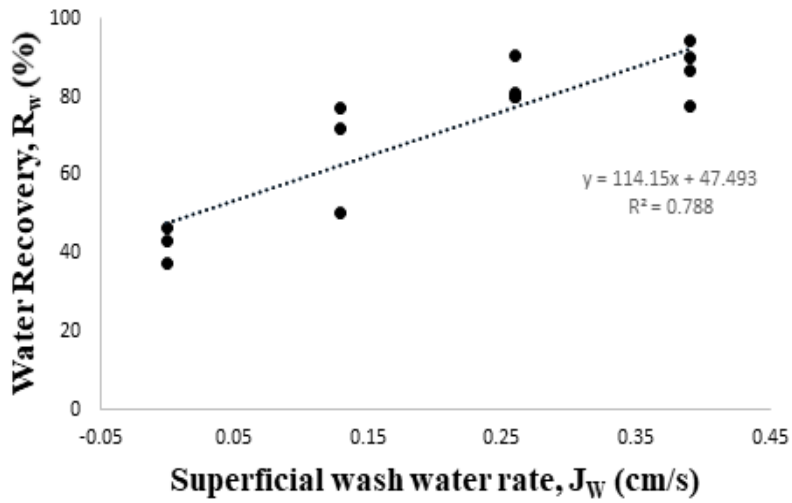


Fig 4.2.12 Relationship of superficial wash water rate (J_w) and water recovery (R_w)

Fig 4.2.13은 가스속도에 따른 물 회수율 변화를 나타내었는데 가스속도와 물 회수율 사이에는 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

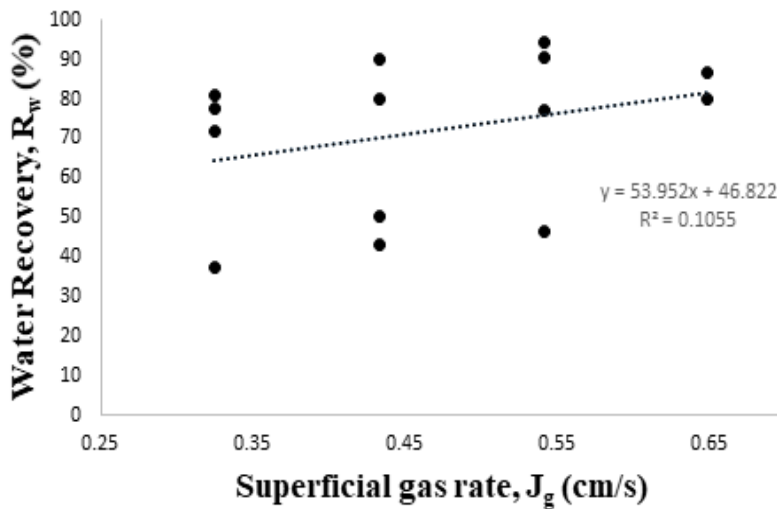


Fig 4.2.13 Relationship of superficial gas rate (J_g) and water recovery (R_w)

Fig 4.2.14는 바이어스와 물 회수율 관계를 나타낸 것으로 바이어스가 감소함에 따라 물 회수율이 감소하는 추세를 보였으나 회귀분석 결과 신뢰도가 낮은 결과를 얻었다. 이는 물 회수율이 세척수에 뿐만 아니라 포집대에서 상승하는 물도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며 이와 관련한 가스속도 및 기포제 종류 등의 다양한 조건들의 고려 및 추가적인 연구가 요구된다.

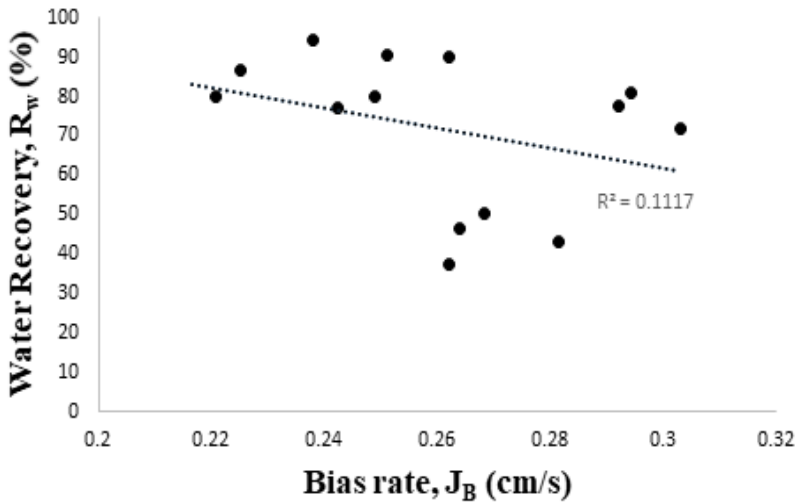


Fig 4.2.14 Relationship of bias rate (J_B) and water recovery (R_w)

이를 종합하면 세척수는 상승하는 물과 바이어스 인 하강하는 물로 나뉘게 된다. 이때 가스속도에 따라 바이어스가 감소하는 것으로 보아 두 변수 사이에 직접적인 상관관계를 보이며 물 회수율은 포집대에서 상승하는 물과 세척수사이에서 직접적인 상관관계를 보이는 것으로 판단된다.

황화광 컬럼부선

합금황화광물의 컬럼부선 특성을 파악하고 품위향상을 위한 실험을 진행하였다. Fig 4.2.15.는 가스속도 및 세척수의 제어를 통해 얻어진 품위 및 회

수율의 관계를 나타낸 것으로써 가스속도가 증가할수록 회수율이 증가하지만 품위는 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 가스속도에 비례하여 가스홀드업, 기포크기 및 기포표면적비가 증가하게 되어 광물의 부착빈도가 높아지고 결국 많은 양의 광물이 부유되어 회수율이 증가하는 것으로 판단된다. 반면, 가스속도에 반비례하여 품위가 감소하는 이유는 강한 상향류로 인해 맥석의 동반부유빈도가 증가하기 때문으로 판단된다.

일반적으로 세척수속도의 증가는 세척대의 경계면을 확장시키고 흡기현상을 감소시켜 품위가 향상되고 정체하며 부유되지 못하는 광물이 넘쳐흐르도록 물을 공급하는 역할을 한다. 그러나 본 연구에서 세척수속도가 증가했을 때 오히려 품위가 저하되고 회수율이 증가하는 것을 확인 하였다. 이 같은 결과는 광미조절부를 고정한 것이 원인으로 판단되는데 광미배출량이 일정하기 때문에 세척수가 컬럼내부의 경계면을 상승시키고 음(-)의 바이어스가 강해져 세척작용을 감소시킨 것으로 판단된다.

회수율의 경우 양(+)의 바이어스가 감소함에 따라 세척대의 기포층에 공급하는 물량이 증가하여 회수율이 증가하는 것으로 판단된다.

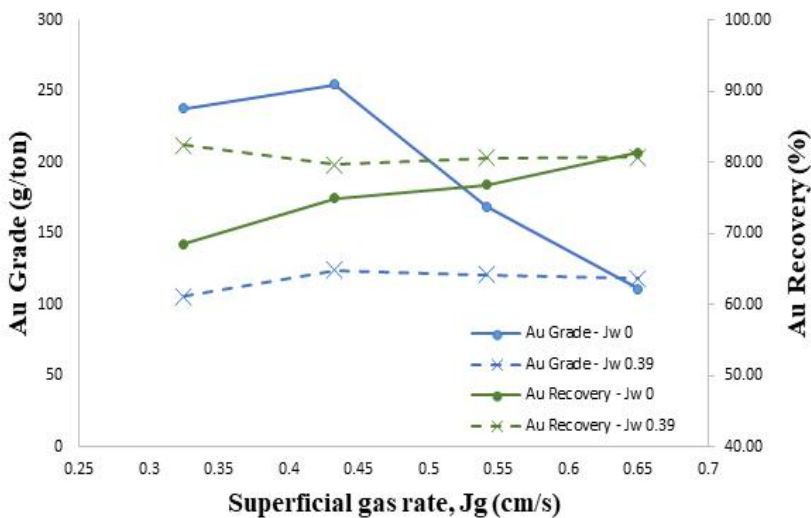


Fig 4.2.15. Grade & recovery of gold as function of superficial gas rate (Jg).

Fig 4.2.16은 세척수의 증가에 따른 경계면의 상승을 도식화한 것으로 광미의 배출량이 일정한 상황에서 투입량이 많아지면 컬럼내의 경계면이 상승하는 현상을 관찰할 수 있었다. 상승된 경계면은 세척수에 의한 세척작용을 감소시키고 음(-)의 바이어스를 강화하여 폼위를 감소시킨다. 즉, 바이어스의 측정없이 광미배출량을 조절을 통해 경계면 깊이를 제어할 때는 세척수가 역으로 상승 할 수 있다는 점을 고려할 필요가 있고 추후 연구에서는 일정한 깊이의 경계면이 유지될 수 있도록 고려해야 한다.

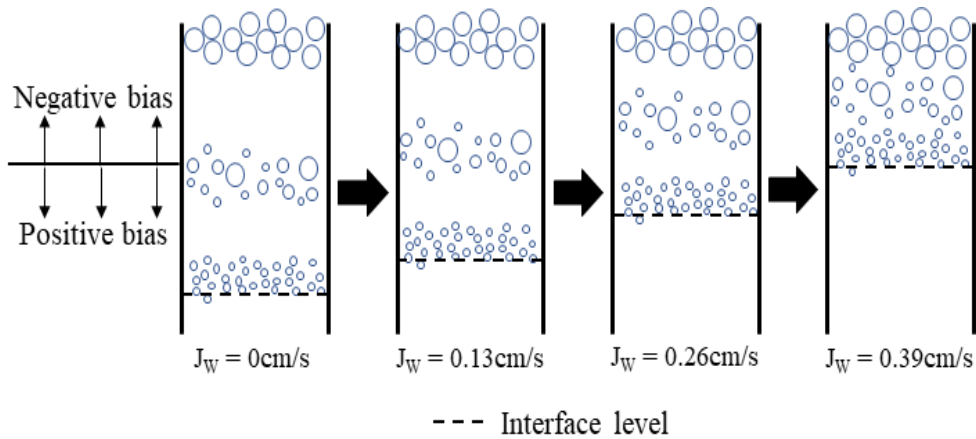


Fig 4.2.16. Decrease of cleaning zone as increase of superficial wash water rate (J_w)

Fig 4.2.17은 물 회수율에 따른 폼위 및 회수율의 관계를 나타낸 것으로 물 회수율이 증가함에 따라 폼위는 감소하고 회수율은 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 세척대에서 물 회수율은 세척수와 밀접한 관계를 갖는데 세척수가 증가할 때 광미의 배출량이 일정하여 음(-)의 바이어스를 강화시키고 물 회수율 및 회수율을 증가시킨 것으로 판단된다. 또한 음(-)의 바이어스가 강화됨에 따라 세척수에 의한 세척작용이 감소하여 폼위가 저하되는 것으로 사료된다.

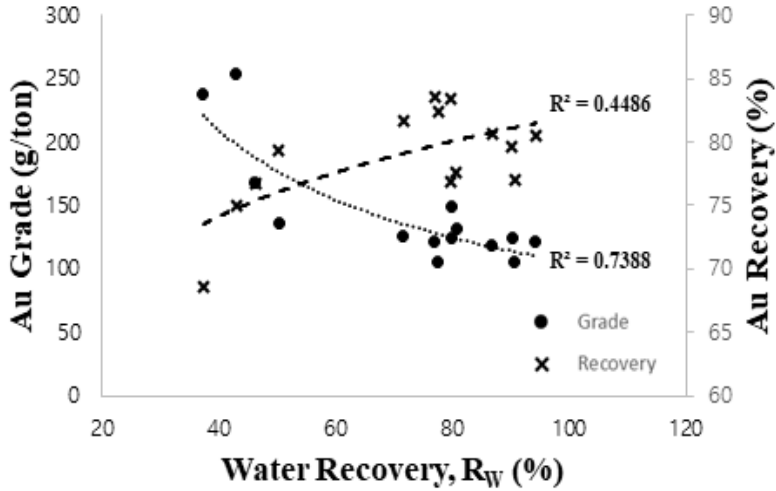


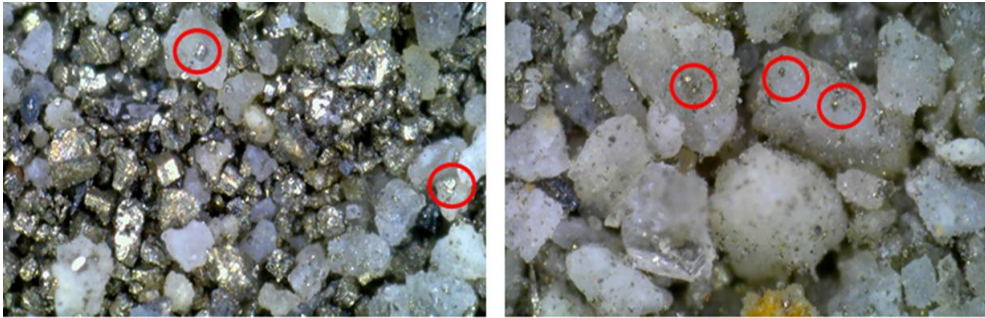
Fig 4.2.17. Relationship of grade and recovery Vs. water Recovery (R_w)

최종적으로 함금황화광물의 컬럼부선 품위향상 실험결과, (주)썬시멘트의 60g/t의 저품위 일반부선 정광으로부터 금의 품위와 회수율이 각각 150g/t와 85%인 산물을 얻을 수 있었으며 특정 조건에서 회수율의 저하를 다소 감소 하더라도 금의 품위가 최대 250g/t인 정광을 생산할 수 있었다.

Fig 4.2.18.은 컬럼부선 산물을 대상으로 관찰된 실체현미경 사진으로 정광에 다량의 단체분리된 미립자 목적광물이 농축되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

함금황화광물의 컬럼부선을 통해 선별효율이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 아직 본 연구에서 물질수지 조절시 광미 배출을 고정시킴에 따라 세척수가 미치는 영향의 확인이 부족하였으며 향후 일정한 깊이의 경계면에서 세척수가 미치는 영향을 확인하는 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다고 판단된다. 향후 이들 물질수지에 따라 컬럼내부 체계를 안정시키고 가

스분산특성과 바이어스의 조절을 통해 금의 품위를 보다 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.



Concentrate

Tailings

Fig 4.2.18. Stereomicroscope photographs of concentrate & tailings

제 5 장. 결론

전 세계적으로 컬럼부선에 관한 연구개발이 활발히 진행 중에 있으며 자동화 플랜트 가동율이 높은 상태이다. 따라서 국내 현장 적용을 위한 컬럼부선의 주요변수, 가동조건 및 상호관계 등 기초적인 운용체계의 정립이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 컬럼부선의 구조적 메커니즘을 체계적으로 수립하고 국내 저품위 미립자광 선별을 위한 기초특성 인자들의 상호관계를 정립하고자 하였다. 따라서 액체 및 기체 2상에서 가스속도, 가스홀드업, 기포크기, 기포표면적비 등의 가스분산특성 인자들의 상호관계를 파악하였으며 2상에서의 연구결과를 기반으로, 액체, 기체 및 고체 3상에서 합금황화광물의 선별효율 향상을 위한 가스분산특성 및 바이어스 제어 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에 이용된 주요 장치는 기포발생장치 타입별(포러스, 인라인믹서, 케비테이션) 컬럼부선기, 가스홀드업 측정을 위한 마노미터(Mano meter) 및 기포크기 측정을 위한 초고속 카메라/제이스(Zeiss) 시스템이었다. 드리프트 플럭스 및 간섭침강식을 이용하여 기포크기를 산정하였으며 초고속 카메라 시스템의 직접 측정값과 비교한 관계식을 도출하였다.
2. 본 연구에 사용된 시료는 (주)썬시멘트에서 기존에 생산되었던 Au 120g/t 인 일반부선 정광에 비해 품위가 상당히 저하된 약 Au 60g/t의 저품위 합금황화광 정광이었다. 입도분석결과 270mesh 이하에서 약 Au 80g/t 함량을 나타내어 미립자에 보다 더 합금황화광이 농축된 것을 알 수 있었다.
3. 부선컬럼 내의 2상에서 가스분산특성에 관한 주요변수의 연구를 수행하였다. 기포제 종류 및 농도별 가스분산특성 연구결과, 기포제의 농도 증가는

표면장력을 낮추고 기포크기를 감소시키는 것으로 판단되며 기포제 종류 비교시 MIBC가 표면장력을 보다 더 감소시키는 것으로 확인되었다.

4. 스파저 종류별 가스분산특성 연구결과, 포러스 타입은 가스속도의 증가에 따라 가스홀드업이 증가하며 인라인믹서 및 케비테이션 타입은 그 반대 현상이 발생하였다. 이는 기포의 생성방법의 차이 때문으로 판단된다.
5. 포러스, 케비테이션 및 인라인믹서 타입별 평균 기포크기는 각각 0.718, 0.613 및 0.630mm로써 케비테이션과 인라인믹서가 보다 더 작은 기포를 형성시키는 것으로 확인되었다. 두 가지 타입의 경우 가스속도 증가에 따라 압축력이 강해져 폭기시 더 작은 기포를 형성하는 것으로 판단된다. 또한 각 타입별 측정 및 산정된 기포크기 비교결과, 관계식의 오차 범위 $\pm 15\sim 20\%$ 내외에서 두 방식의 기포크기가 유사한 비례식을 얻어 본 실험 조건에서 기포크기를 제어할 수 있는 산정식을 개발하였다.
6. 2상에서의 연구결과를 기반으로, 액체, 기체 및 고체 3상에서 합금황화광물의 컬럼부선 결과, 먼저 가스분산특성에 있어서 가스속도 0.32~0.65cm/s 및 세척수 0~0.39cm/s의 조건에서 가스속도의 증가에 기포크기, 가스홀드업, 기포표면적비가 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 기포크기 증가에 따라 컬럼내의 단위면적(부피)당 차지하는 면적(부피)이 증가하기 때문으로 판단된다.
7. 운송율 및 바이어스 특성 연구결과, 가스속도 및 가스홀드업 증가에 따라 운송율은 비례적으로 증가하고 바이어스의 경우 반비례 관계를 나타내어 상향류와 관련한 가스속도와 하향류와 관련한 세척수의 조절에 따라 합금황화광의 품위와 회수율 제어할 수 있을 것으로 사료된다. 한편 물 회수율의 경우 가스속도와 바이어스에 큰 영향을 받지 않고 세척수의 첨가량에

만 영향을 받는 것을 확인하였다.

8. 함금황화광물의 컬럼부선 품위향상 실험결과, (주)썬시멘트의 60g/t의 저품위 일반부선 정광으로부터 금의 품위와 회수율이 각각 150g/t와 85%인 산물을 얻을 수 있었으며 특정 조건에서 회수율의 저하를 다소 감소하더라도 금의 품위가 최대 250g/t인 정광을 생산할 수 있었다. 실체현미경 관찰결과, 정광에 다량의 단체분리된 미립자 목적광물이 농축되어 있는 것을 확인할 수 있었다.
9. 한편 본 연구에서 세척수 및 물 회수율의 증가에 따라 금의 품위는 감소한 반면 회수율은 상대적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 물질수지 조절시 광미 배출을 고정시킴에 따라 세척수에 의한 컬럼 내의 물 수위의 증가 때문인 것으로 판단되며 향후 이들 물질수지 조절에 따라 컬럼내부 체계를 안정시키고 가스분산특성과 바이어스의 조절에 따라 금의 품위를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

김민규, 한오형, 2013, 국내산 미립 석탄의 고품위화를 위한 부유선별 연구, 한국리싸이클링학회지, Vol. 22, No.6, pp, 64-72.

김우람, 한오형, 2016, 석탄 품위향상을 위한 CPT column 부선 연구, (조선대학교 학위논문).

이강문, 1985, 광물처리공학, 반도출판사, 서울, 한국.

이정언, 나성수, 신진혁, 안영철, 박찬정, 김시훈, 이종호, 이재근, 1999, 수직 컬럼에서 미세기포 거동에 관한 연구, 대한기계학회, 1999년도 춘계학술대회논문집B, PP. 297-302.

이정언, 이재근, 1999, 역류형 컬럼 부선기를 이용한 석탄회 정제에 관한 연구, Journal of Korean Inst. Resources Recycling, Vol. 8, No. 5, PP. 51-58.

한오형, 강현호, 2006, Microbubble column에 의한 인상흑연의 부선에 관한 연구, 한국자원리싸이클링학회, Vol. 15, No. 2, pp. 37-44.

한오형, 홍종원, Jambal Davaasuren, 박신웅, 2011, 인상흑연의 품위향상을 위한 Microbubble column 부선 특성 연구, 한국지구시스템공학회, Vol. 48, No. 5, pp. 631-638.

Ali Vazirizadeh, Jocelyn Bouchard and Yun Chen, 2016, Effect of particles on bubble size distribution and gas hold-up in column flotation, International journal of Mineral Processing, Vol. 157, PP. 163-173.

A. Maachar and G. S. Dobby, 1991, Measurement of feed water recovery

and entrainment solids recovery in flotation columns, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 31, No. 3, PP. 167-172.

A. Rabieh, B. Albjanic and J. J. Eksteen, 2016, A review of the effects of grinding media and chemical conditions on the flotation of pyrite in refractory gold operations, Minerals Engineering, Vol. 94, PP. 21-28.

A. Riquelme, A. Desbiens, R. del Villar and M. Maldonado, 2016, Predictive control of the bubble size distribution in a two-phase pilot flotation column, Minerals Engineering, Vol. 89, PP. 71-76.

Balraju Vadlakonda and Narasimha Mangadoddy, 2017, Hydrodynamic study of two phase flow of column flotation using electrical resistance tomography and pressure probe techniques, Separation and Purification Technology, Vol. 184, PP. 168-187.

Bao Lin, Bodil Recke, Jorgen K. H. Knudsen and Sten Bay Jorgensen, 2008, Minerals engineering, Vol. 21, PP. 539-548.

Barry A. Wills and James A. Finch, 2015, Will' s Mineral Processing Technology: An introduction to the prctical aspects of ore treatment and mineral recovery 8th Edition, Butterworth-Heinemann(UK), PP 512.

Chao Li and Liguang Wang, 2018, Improved froth zone and collection zone recoveries of fine mineral particles in a flotation column with oscillatory air supply, Separation and Purification Technology, Vol. 193, PP. 311-316.

Chul-Hyun Park, Nimal Subasinghe and Oh-Hyung Han, 2015, Amenability Testing of Fine Coal Beneficiation Using Laboratory Flotation Column,

Materials Transactions, Vol. 56, No.5, PP. 766-773.

C. O. Gomez and Finch, 2007, Gas dispersion measurements in flotation cells, International journal of Mineral Processing, Vol. 84, PP. 51-58.

D. Tao, G. H. Luttrell and R. -H. Yoon, 2000, A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles, International Journal of Mineral processing, Vol. 59, PP. 25-43.

F. Chen, C.O. Gomez and J.A. Finch, 2001, Bubble size measurement in flotation machines, Minerals engineering, Vol. 14, No.4, PP.427-432.

Giorgio Besagni and Fabio Inzoli, 2016, Bubble size distributions and shapes in annular gap bubble column, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 74, PP. 27-48.

Greg Harbort and Danica Clarke, 2017, Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns – An overview, Minerals Engineering, Vol. 100, PP. 17-30.

Haiyang Zhang and Xuezhi Zhang, 2019, Microalgal harvesting using foam flotation: A critical review, Biomass and Bioenergy, vol. 120, PP. 176-188.

Jacob. H. Masliyah, 1979, Hindered settling in a multi-species particle system, Chemical engineering science, Vol 34, PP. 1166-1168.

J.A. Finch and G.S. Dobby, 1991, Column Flotation, Pergamon Press plc(UK), 180.

Jan E. Nasset, Jose R. Hernandez-Aguilar, Claudio Acuna, Cesar O. Gomez and James A. Finch, Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines, *Minerals engineering*, Vol. 19, PP. 807-815.

Jarmo Ilonen, roman Juranek, Tuomas Eerola, Lasse Lensu, Marketa Dubska, Pavel Zemcik and Heikki Kalviainen, 2018, Comparison of bubble detectors and size distribution estimators, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 101, PP. 60-66.

Jason Pyecha, Brigitte Lacouture, Scott Sims, George Hope and Andrew Stradling, 2006, Evaluation of a Microcel™ sparger in the Red Dog column flotation cells, *Minerals Engineering*, Vol. 19, PP. 748-757.

J.B. Yianatos and F. Henriquez, 2007, Boundary conditions for gas rate and bubble size at the pulp-froth interface in floatation equipment, *Minerals Engineering*, Vol. 20, PP. 625-628.

J.B. Yianatos, J.A. Finch, G.S. Dobby and Manqiu Xu, 1987, Bubble size estimation in a bubble swarm, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 126, No. 1, PP.37-44.

Jessica Vandenberghe, Jaewon Choung, Zhenghe Xu and Jacob Masliyah, 2005, Drift flux modelling for a two-phase system in a flotation column, *The canadian journal of chemical engineering*, Vol 83, PP. 169-176.

J. Rubio, M.L. Souza and R.W. Smith, 2002, Overview of flotation as a wastewater treatment technique, *Minerals engineering*, Vol 15, PP. 139-155.

J. Yianatos, L. Bergh, L. Vinnett, I. Panire and F. Diaz, 2015, Modelling of residence time distribution of liquid and solid in mechanical flotation cells,

Minerals engineering, Vol. 78, PP. 69-73.

J. Yianatos, L. Vinnett, I. Panire, M. Alvarez-Silva and F. Diaz, 2017, Residence time distribution measurements and modelling in industrial flotation columns, Minerals Engineering, Vol. 110, PP. 139-144.

K. A. Matis, G. P. Gallios and K. A. Kydros, 1993, Separation of fines by flotation techniques, Separation Technology, Vol. 3, PP. 76-90.

Lijun Deng, Guosheng Li, Yijun Cao and Zilong Ma, 2017, Flotation behavior of nickel sulfide ore in a cyclonic flotation column, Physicochemical Problems of Mineral Processing, Vol. 53, No. 2, PP. 770-780.

L. Vinnett, J. Yianatos and M. Alvarez, 2014, Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators, Minerals Engineering, Vol. 57, PP. 12-15.

L. Vinnett, T. Ledezma, M. Alvarez-Silva and K. Waters, 2016, Gas holdup estimation in flotation machines using image techniques and superficial gas velocity, Minerals Engineering, Vol. 96-97, PP. 26-32.

L. Wang, K. Runge and Y. Peng, 2016, The observed effect of flotation operating conditions and particle properties on water recovery at laboratory scale, Minerals Engineering, Vol. 94, PP. 83-93.

Markus Lichti and Hans-jorg Bart, 2018, Bubble size distributions with a shadowgraphic optical probe, Flow measurement and instrumentation, Vol. 60, PP. 164-170.

M. Maldonado, A. Desbiens, E. Poulin, R. del Vilar and A. Riquelme, 2015, Automatic control of bubble size in a laboratory flotation column, International journal of Mineral Processing, Vol. 141, PP. 27-33.

Nam-Il Um, Ji-Whan Ahn, Gi-Chun Han, Sung-Joo Lee, Hyung-Seok Kim and Heechan cho, 2008, Flotation process in coal bottom ash and their effect on the removal of unburned carbon, Geosystem Engineering, Vol.11, PP. 75-80.

N. E. Altun, C. Hicyilmaz, J. Y. Hwang and A. S. Bagci, 2006, Beneficiation of Himmetoglu oil shale by flotation as a solid fuel substitute, Energy and Fuels, Vol. 20, PP. 214-221.

Oh-Hyung Han, Min-Kyu Kim, Byoung-Gon Kim, Nimal Subasinghe and Chul-Hyun Park, 2014, Fine coal beneficiation by column flotation, Fuel Processing Technology, Vol. 126, PP. 49-59.

R. Arellano-Pina, J. A. Delgadillo and R. Perez-Garibay, 2017, Effect of gas superficial velocity (Jg) and frother/ collector (MIBC/ X-343) reagent dosage on froth horizontal displacement and galena drainage, Minerals Engineering, Vol. 114, PP. 8-16.

R. Perez Garibay, P. M. Gallegos A, A. Uribe S and F. Nava A, 2002, Effect of collection zone height and operating variables on recovery of overload flotation columns, Minerals Engineering, Vol. 15, PP. 325-331.

R. Q. Honaker and M. K. Mohanty, 1996, Enhanced column flotation performance for fine coal cleaning, Minerals Engineering, Vol. 9, No. 9, PP. 931-945.

R. T. Rodrigues and J. Rubio, 2003, New basis for measuring the size

distribution of bubbles, minerals engineering, Vol. 16, PP. 757-765.

S. Banisi, J. A. Finch and A. R. Laplante, 1995, Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns-I. Measurement, Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 14, pp. 2329-2334.

S. Banisi, J. A. Finch and A. R. Laplante, 1995, Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns-II. Investigation of mechanisms of gas holdup reduction in presence of solids, Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 14, pp. 2335-2342.

Seher Ata, Nafis Ahmed and Graeme J. Jameson, 2003, A study of bubble coalescence in flotation froths, International journal of Mineral Processing, Vol. 72, PP. 255-266.

Shahrouz Mohagheghian and Brian R. Elbing, 2018, Characterization of Bubble size Distributions within a Bubble Column, Fluids, Vol. 3, Iss. 1.

Shaohua Chen, Wenqi Gong, Guangjun Mei, Qi Zhou, Cuiping Bai and Nian Xu, 2011, Primary biodegradation of sulfide mineral flotation collectors, Minerals Engineering, Vol. 24, PP. 953-955.

S. J. Gulden, C. Riedele, S. Rollie, M. H. Kopf and H. Nirschl, 2018, Online bubble size analysis in micro flotation, Chemical Engineering Science, Vol. 185, PP. 168-181.

S. R. S. Sastri, P. S. R. Reddy, K. K. Bhattacharyya, S. G. Kumar and K. S. Narasimhan, 1988, Recovery of coal fines using column flotation, Minerals Engineering, Vol. 1, PP. 359-363.

S. Schwarz and D. Alexander, 2006, Gas dispersion measurements in industrial flotation cells, *Mineral engineering*, Vol. 19, PP. 554-560.

V. E. Ross, 1997, Particle-Bubble attachment in flotation froths, *Minerals Engineering*, Vol. 10, No. 7, PP. 695-706.

V. Martinez-Gomez, R. Perez-Garibay and J. Rubio, 2013, Factors involving the solids-carrying flotation capacity of microbubbles, *Minerals Engineering*, Vol. 53, 160-166.

V. Ravichandran, C. Eswaraiah, R. Sakthivel, S. K. Biswal and P. Manisankar, 2013, Gas dispersion characteristics of flotation reagents, *Powder technology*, Vol. 235, PP. 329-335.

Wang, X. H. and Forsberg, K. S. E., 1995, The solution electrochemistry of sulfide-xanthate-cyanide systems in sulfide minerals flotation, *Mineral Engineering*. Vol.9(5), PP. 527-546.

W. J. Trahar, G. D. Senior and L. K. Shannon, 1994, Interactions between sulphide minerals - the collectorless flotation of pyrite, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 40, PP. 287-321.

Y. H. Tan, A. A. Rafiei, A. Elmahdy and J. A. Finch, 2013, Bubble size, gas holdup and bubble velocity profile of some alcohols and commercial frothers, *International journal of Mineral Processing*, Vol. 119, PP. 1-5.

Yianatos J.B., Finch J.A. and Laplante A.R., 1986b, Holdup profile and bubble size distribution of flotation column froths, *Canadian Metallurgical*

Quarterly, 25(1), PP. 23-29.

Y. S. Cho and J. S. Laskowski, 2002, Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, International journal of Mineral Processing, Vol. 64, PP. 69-80.

Xiang-Huai Wang and K. S. Eric Forssberg, 1991, Mechanisms of pyrite flotation with xanthates, International journal of Mineral Processing, Vol. 33, PP. 275-290.

Xiaoping Guan and Ning Yang, 2017, Bubble properties measurement in bubble columns: From homogeneous to heterogeneous regime, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 127, PP. 103-112.

부록

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
C	S Area	V	(ml/ter Vm)	ed Vm	ther(°C)	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	ρ (kg/m³)	EgI(measured)	(tan 140°)	ψ _m (mm/s)	(db tan 140°)	(dbmm)measure
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.157	0.779862467	0.150	0.649612013	0.150	0.649612013
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.157	0.779862467	0.150	0.649612013	0.150	0.649612013
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.157	0.779862467	0.150	0.649612013	0.150	0.649612013
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.157	0.779862467	0.150	0.649612013	0.150	0.649612013
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.386	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.337	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.400	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.423	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.229	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.309	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.280	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.243	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.414	0.908332008	0.698685269	0.713830000	
14	38.48451001	3000	600	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.180	0.908332008	0.698685269	0.713830000	
15	38.48451001	3000	900	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.314	0.908332008	0.698685269	0.713830000	
16	38.48451001	3000	1200	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.254	0.908332008	0.698685269	0.713830000	
17	38.48451001	1500	300	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.209	0.779862467	0.507068317	0.687190000	
18	38.48451001	1500	600	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.197	0.779862467	0.507068317	0.687190000	
19	38.48451001	1500	900	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.183	0.779862467	0.507068317	0.687190000	
20	38.48451001	1500	1200	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.180	0.779862467	0.507068317	0.687190000	
21	38.48451001	2000	300	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.423	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
22	38.48451001	2000	600	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.406	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
23	38.48451001	2000	900	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.343	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
24	38.48451001	2000	1200	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.437	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
25	38.48451001	2500	300	1000	90	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.400	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
26	38.48451001	2500	600	1000	90	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.400	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
27	38.48451001	2500	900	1000	90	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.314	0.830815406	0.565058483	0.763570000	
28	38.48451001	2500	1200	1000	90	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1.000	0.300	0.830815406	0.565058483	0.763570000	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
C	S Area	V	(ml/ter Vm)	ed Vm	ther(°C)	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	U ₀ (m/s)	U ₁₀ (m/s)	U ₂₀ (m/s)	Re ₀	Re ₁₀	Re ₂₀	m	U ₀ (m/s)	U ₁₀ (m/s)	U ₂₀ (m/s)	U ₃₀ (m/s)	
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.097595688	0.080590092	0.089984054	34.63619163	20.0436318	3.206583744	0.048018573	0.048018573	0.048018573	0.048018573	0.048018573	0.048018573	0.048018573
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.052693173	0.080590092	0.077433601	39.72528993	24.4060125	3.180170167	0.053566901	0.053566901	0.053566901	0.053566901	0.053566901	0.053566901	0.053566901
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.035077135	0.080590092	0.076906668	41.71587999	25.6772301	3.147714764	0.055027663	0.055027663	0.055027663	0.055027663	0.055027663	0.055027663	0.055027663
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.036326013	0.080590092	0.077017616	41.72011746	24.88055181	3.145307717	0.054126768	0.054126768	0.054126768	0.054126768	0.054126768	0.054126768	0.054126768
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.198516117	0.086564819	0.08912997	44.1786364	9.627903205	3.128690058	0.031620793	0.031620793	0.031620793	0.031620793	0.031620793	0.031620793	0.031620793
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.087035408	0.086564819	0.086770408	43.92520479	12.2809789	3.132270708	0.039144397	0.039144397	0.039144397	0.039144397	0.039144397	0.039144397	0.039144397
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.044317107	0.086564819	0.084654457	45.4075561	19.4947732	3.127450864	0.047310687	0.047310687	0.047310687	0.047310687	0.047310687	0.047310687	0.047310687
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.014458230	0.086564819	0.086693251	48.98048835	22.39626428	3.107701982	0.051125511	0.051125511	0.051125511	0.051125511	0.051125511	0.051125511	0.051125511
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.101313819	0.091502562	0.10965193	61.71827927	11.29415814	3.036556161	0.053515138	0.053515138	0.053515138	0.053515138	0.053515138	0.053515138	0.053515138
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.091820950	0.091502562	0.096794211	51.17261968	17.77793002	3.071946232	0.045108631	0.045108631	0.045108631	0.045108631	0.045108631	0.045108631	0.045108631
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.083132862	0.091502562	0.098888316	58.53475946	14.48771021	3.057854472	0.050095741	0.050095741	0.050095741	0.050095741	0.050095741	0.050095741	0.050095741
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.016295608	0.091502562	0.106801928	63.54794559	27.31582441	3.03857055	0.05164886	0.05164886	0.05164886	0.05164886	0.05164886	0.05164886	0.05164886
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.040014731	0.095745354	0.118975048	72.77282103	14.68691496	2.994734817	0.046097275	0.046097275	0.046097275	0.046097275	0.046097275	0.046097275	0.046097275
14	38.48451001	3000	600	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.016295608	0.095745354	0.121134669	76.3536135	16.6510393	2.9831965	0.044029259	0.044029259	0.044029259	0.044029259	0.044029259	0.044029259	0.044029259
15	38.48451001	3000	900	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.028288444	0.095745354	0.113194468	73.69644453	18.23458123	2.97021986	0.043333872	0.043333872	0.043333872	0.043333872	0.043333872	0.043333872	0.043333872
16	38.48451001	3000	1200	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.008499127	0.095745354	0.114085455	79.91472209	33.36287976	2.98054087	0.03869612	0.03869612	0.03869612	0.03869612	0.03869612	0.03869612	0.03869612
17	38.48451001	1500	300	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.180121883	0.080590092	0.06479217	28.0194473	13.48828253	3.256467503	0.038259463	0.038259463	0.038259463	0.038259463	0.038259463	0.038259463	0.038259463
18	38.48451001	1500	600	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.158318679	0.080590092	0.067787805	31.59015197	15.557758	3.20333761	0.041582004	0.041582004	0.041582004	0.041582004	0.041582004	0.041582004	0.041582004
19	38.48451001	1500	900	1000	90	0.649612013	0															

I	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	
	C S Area	cm ²	V	(m ³)	iter	V(m ³)	iter	V(m ³)	iter	V(m ³)	ther	Jg	(cm/s)	Jw	(cm/s)	Jf	(cm/s)	Jl	(cm/s)	p	(1/ka/n ³)	Eg1(measured)	(start: 140cm)	position	u _g (mm/sec)	(dim/jcal.)	(dim/jcal.)	(dim/jmeasure)
30	38.48451001	3000	300	1000	90	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.457			0.908332008	0.712360507	0.749030000		
31	38.48451001	3000	600	1000	90	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.414			0.908332008	0.72523415	0.752230000		
32	38.48451001	3000	900	1000	90	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.343			0.908332008	0.7395464	0.775590000		
33	38.48451001	3000	1200	1000	90	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.309			0.908332008	0.762444095	0.838120000		
34	38.48451001	3000	1500	1000	120	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.209			0.779862467	0.607204096	0.672430000		
35	38.48451001	1500	600	1000	120	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.200			0.779862467	0.528988711	0.658940000		
36	38.48451001	1500	900	1000	120	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.194			0.779862467	0.549023238	0.658010000		
37	38.48451001	1500	1200	1000	120	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.191			0.779862467	0.566780145	0.653470000		
38	38.48451001	2000	300	1000	120	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.423			0.830815406	0.571991304	0.732600000		
39	38.48451001	2000	600	1000	120	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.371			0.830815406	0.584332543	0.730260000		
40	38.48451001	2000	900	1000	120	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.363			0.830815406	0.604530396	0.715530000		
41	38.48451001	2000	1200	1000	120	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.320			0.830815406	0.616420284	0.704790000		
42	38.48451001	2500	300	1000	120	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.529			0.872619159	0.707889963	0.892920000		
43	38.48451001	2500	600	1000	120	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.480			0.872619159	0.793820005	0.881140000		
44	38.48451001	2500	900	1000	120	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.429			0.872619159	0.695059377	0.838840000		
45	38.48451001	2500	1200	1000	120	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.389			0.872619159	0.701274845	0.783680000		
46	38.48451001	3000	300	1000	120	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.586			0.903832008	0.817085769	0.972270000		
47	38.48451001	3000	600	1000	120	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.566			0.903832008	0.854503780	0.894050000		
48	38.48451001	3000	900	1000	120	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.514			0.903832008	0.815535326	0.863790000		
49	38.48451001	3000	1200	1000	120	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.429			0.903832008	0.780924582	0.847160000		
50	38.48451001	1500	300	1000	150	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.200			0.779862467	0.513471616	0.624010000		
51	38.48451001	1500	600	1000	150	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.197			0.779862467	0.531261228	0.640740000		
52	38.48451001	1500	900	1000	150	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.194			0.779862467	0.549021071	0.643400000		
53	38.48451001	1500	1200	1000	150	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.191			0.779862467	0.566778089	0.658460000		
54	38.48451001	2000	300	1000	150	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000											0.386			0.830815406	0.565056533	0.782140000		
55	38.48451001	2000	600	1000	150	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000											0.343			0.830815406	0.575782275	0.733180000		
56	38.48451001	2000	900	1000	150	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000											0.314			0.830815406	0.595799054	0.714600000		
57	38.48451001	2000	1200	1000	150	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000											0.257			0.830815406	0.623120837	0.687520000		

Appendix 2. Gas dispersion data of porous type_2

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
C S Area	V	iter	Vmid	Vmed	Vmin	ther	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	ρ (kg/m³)	Eg1(measured)	start: 140c	position -	ds (mm)ref -	(dmm)cal -	(dmm)measure -
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.443		0.872619159	0.647930854	0.802940000		
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082686688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.371		0.872619159	0.649285514	0.725190000		
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082686688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.357		0.872619159	0.669440621	0.716130000		
61	38.48451001	2500	1200	1000	150	1.082686688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.323		0.872619159	0.688045563	0.726240000		
62	38.48451001	3000	300	1000	150	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.500		0.908332008	0.731796351	0.865510000		
63	38.48451001	3000	600	1000	150	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.457		0.908332008	0.741164269	0.839920000		
64	38.48451001	3000	900	1000	150	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.400		0.908332008	0.743309371	0.806500000		
65	38.48451001	3000	1200	1000	150	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.343		0.908332008	0.758287310	0.802970000		
66	38.48451001	1500	300	1000	200	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.171		0.779862467	0.543243710	0.630790000		
67	38.48451001	1500	600	1000	200	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.157		0.779862467	0.578919088	0.627800000		
68	38.48451001	1500	900	1000	200	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.151		0.779862467	0.603198518	0.626450000		
69	38.48451001	1500	1200	1000	200	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.149		0.779862467	0.632819986	0.626350000		
70	38.48451001	2000	300	1000	200	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.400		0.830815406	0.563977443	0.744320000		
71	38.48451001	2000	600	1000	200	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.357		0.830815406	0.580557491	0.713320000		
72	38.48451001	2000	900	1000	200	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.286		0.830815406	0.597461744	0.640920000		
73	38.48451001	2000	1200	1000	200	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.243		0.830815406	0.629527793	0.619400000		
74	38.48451001	2500	300	1000	200	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.404		0.872619159	0.645040811	0.767980000		
75	38.48451001	2500	600	1000	200	1.082686688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.439		0.872619159	0.659796362	0.728900000		
76	38.48451001	2500	900	1000	200	1.082686688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.343		0.872619159	0.667863188	0.727410000		
77	38.48451001	2500	1200	1000	200	1.082686688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.329		0.872619159	0.683887375	0.726410000		
78	38.48451001	3000	300	1000	200	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.457		0.908332008	0.712635354	0.806400000		
79	38.48451001	3000	600	1000	200	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.429		0.908332008	0.727636569	0.774510000		
80	38.48451001	3000	900	1000	200	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.371		0.908332008	0.737285721	0.768910000		
81	38.48451001	3000	1200	1000	200	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.357		0.908332008	0.758606322	0.755490000		

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	16	17	18	19	20	21	22	
C S Area	V	iter	Vmid	Vmed	Vmin	ther	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	Ug (m/s) ref -	Ug (m/s) Q(4) -	Reb -	Reus -	m -	Us1 (m/s)2 -	Us2 (m/s)2.1 -
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.155009146	0.091502562	0.112883634	64.15888721	10.9414309	3.025680301	0.04355284	0.034552812
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082686688	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.075904486	0.091502562	0.103968073	59.21488063	14.38200725	3.50523001	0.040172976	0.040172009
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082686688	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.046693979	0.091502562	0.105981684	62.23733896	16.21258248	3.305799622	0.04311489	0.0431115
61	38.48451001	2500	1200	1000	150	1.082686688	0.51968961	0.433074675	0.952764285		-0.071834437	0.091502562	0.105123061	63.48000791	19.46576597	3.024582564	0.047604902	0.047604734
62	38.48451001	3000	300	1000	150	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.12813649	0.095745354	0.141900539	91.76706704	12.44230352	2.931337504	0.037244422	0.037244396
63	38.48451001	3000	600	1000	150	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.098755731	0.095745354	0.134996349	87.16707946	14.05358369	2.944967804	0.041184832	0.041184793
64	38.48451001	3000	900	1000	150	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.063190629	0.095745354	0.125915086	82.09988047	10.80220255	2.649836630	0.046194632	0.046194635
65	38.48451001	3000	1200	1000	150	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285		-0.044682690	0.095745354	0.119959857	79.79301523	22.90123541	2.954292904	0.052392621	0.052392522
66	38.48451001	1500	300	1000	200	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.087564290	0.080590092	0.067833571	32.32470234	17.64488201	3.224713376	0.044688826	0.044688847
67	38.48451001	1500	600	1000	200	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.048989912	0.080590092	0.071996968	36.56262418	21.2128248	3.190571017	0.049596005	0.049595964
68	38.48451001	1500	900	1000	200	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.03255482	0.080590092	0.075070702	39.68818851	23.61533095	3.076396042	0.047604902	0.047604734
69	38.48451001	1500	1200	1000	200	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285		-0.03530014	0.080590092	0.077525244	42.35462407	25.54403743	3.1503202	0.05491407	0.054913912
70	38.48451001	2000	300	1000	200	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.174502557	0.086564819	0.091502435	45.73586413	17.93796696	3.115855744	0.031037018	0.031037393
71	38.48451001	2000	600	1000	200	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.132702509	0.086564819	0.089356273	45.50879631	15.66929739	3.121695516	0.035030929	0.035030882
72	38.48451001	2000	900	1000	200	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.043485266	0.086564819	0.085540326	44.83076534	11.49014829	3.12880051	0.041835014	0.041834675
73	38.48451001	2000	1200	1000	200	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.010187793	0.086564819	0.08675679	47.909806	20.17312017	3.112705597	0.048248652	0.048248602
74	38.48451001	2500	300	1000	200	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.123929819	0.091502562	0.110970219	62.65773192	11.4850269	3.03237489	0.034892254	0.034892216
75	38.48451001	2500	600	1000	200	1.082686688	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.068693818	0.091502562	0.110738394	64.09102075	13.08112987	3.027653299	0.032659586	0.032659531
76	38.48451001	2500	900	1000	200	1.082686688	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.095946812	0.091502562	0.103933911	60.88915215	16.97773488	3.044345656	0.044099869	0.044099513
77	38.48451001	2500	1200	1000	200	1.082686688	0.51968961	0.433074675	0.952764285		-0.03802625	0.091502562	0.105824932	63.90222411	19.11330448	3.032545061	0.04714144	0.04714116
78	38.48451001	3000	300	1000	200	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.094126646	0.095745354	0.128841039	80.51020573	13.1588899	2.965661138	0.038791524	0.038791813
79	38.48451001	3000	600	1000	200	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948		-0.066883631	0.095745354	0.127378749	81.30187452	15.47940965	2.965741758	0.042441318	0.042441417
80	38.48451001	3000	900	1000	200	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.031624279	0.095745354	0.120409334	77.87387169	19.5149088	2.979860064	0.048069775	0.048069729
81	38.48451001	3000	1200	1000	200	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.003116322	0.095745354	0.12213651	81.27502515	21.90221242	2.970065806	0.05119905	0.051198982

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	23	24	25	26	27	28	
C S Area	V	iter	Vmid	Vmed	Vmin	ther	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	meanUsg(cm/s²)	Ug (cm/s)ref -	Us(cm/s)2.6 -	Sb(cm/s)²/cm2 -	Us1-Us2 -	H =
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082686688	0.129922403	0.433074675	0.562997078		3.455282565	9.150256156	11.2883634	10.0259657		

1	C	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N															
2	C	S	Area(cm ²)	V	(ml/meter	Vml/	red	Vml/	therapp	Jg	(cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	ρ	(kg/m ³)	Eg	(measured)	start-	140	composition	d _g	(mm)	ref.	(dim/)	cm)	(dim/)	measure	(d/mm)	measure
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.166	0.77962467	0.551142587			0.77962467									0.687201908					
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.154	0.77962467	0.58378813			0.77962467									0.663930208					
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.163	0.77962467	0.620130685			0.77962467								0.667215385						
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.137	0.77962467	0.64705439			0.77962467								0.684163083						
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.183	0.830815406	0.642304789			0.830815406								0.638666618						
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.169	0.830815406	0.683744783			0.830815406								0.653635621						
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.157	0.830815406	0.72463181			0.830815406								0.657290272						
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143	0.830815406	0.78927994			0.830815406								0.686293903						
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.197	0.872619159	0.72868125			0.872619159								0.661046064						
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.177	0.872619159	0.78977082			0.872619159								0.651546232						
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.163	0.872619159	0.841586711			0.872619159								0.676153276						
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.149	0.872619159	0.90607949			0.872619159								0.711732171						
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.206	0.908323008	0.81958849			0.908323008								0.67985182						
14	38.48451001	3000	600	1000	60	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.191	0.908323008	0.869415816			0.908323008								0.63362162						
15	38.48451001	3000	900	1000	60	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.171	0.908323008	0.945076535			0.908323008								0.695431893						
16	38.48451001	3000	1200	1000	60	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.166	0.908323008	0.981634525			0.908323008								0.659499503						
17	38.48451001	1500	300	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.163	0.77962467	0.555401043			0.77962467								0.649514314						
18	38.48451001	1500	600	1000	90	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.203	0.77962467	0.617618265			0.77962467								0.631764897						
19	38.48451001	1500	900	1000	90	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.143	0.77962467	0.620103552			0.77962467								0.656632						
20	38.48451001	1500	1200	1000	90	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.140	0.77962467	0.640489080			0.77962467								0.625343333						
21	38.48451001	2000	300	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.186	0.830815406	0.637699124			0.830815406								0.615848553						
22	38.48451001	2000	600	1000	90	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.171	0.830815406	0.678031477			0.830815406								0.660126042						
23	38.48451001	2000	900	1000	90	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.169	0.830815406	0.69882498			0.830815406								0.624732364						
24	38.48451001	2000	1200	1000	90	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.157	0.830815406	0.739299945			0.830815406								0.636722179						
25	38.48451001	2500	300	1000	90	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.203	0.872619159	0.716618265			0.872619159								0.631764897						
26	38.48451001	2500	600	1000	90	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.692919498	1000	0.186	0.872619159	0.767308446			0.872619159								0.682447113						
27	38.48451001	2500	900	1000	90	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.177	0.872619159	0.820680951			0.872619159								0.672395127						
28	38.48451001	2500	1200	1000	90	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.171	0.872619159	0.832862210			0.872619159								0.618265397						

1	C	S	Area(cm ²)	B	V	(ml/meter	Vml/	red	Vml/	therapp	Jg	(cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	U ₀	(m/s)	ref.	U ₀	(m/s)	Q/R	R ₀	R _{0u}	m	Us ₁	(m/s)	Us ₂	(m/s)	Us ₂	(m/s)	Us ₂	(m/s)
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.136059321	0.080590092	0.068599368	33.16949153	18.53112993	3.217627405	0.045948978				25.7832072	3.98620139			0.050297787									
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.692919498	-0.070244895	0.080590092	0.072481192	37.11725671	21.7832072	3.98620139					44.53959599	27.7279567			0.071746038									
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.004538996	0.080590092	0.076906668	41.71587998	25.6772301	3.15471447	0.050276663				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	-0.020161046	0.080590092	0.07991678	45.36008702	28.6008235	3.13210479	0.058409513				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.041858294	0.086564819	0.08318821	46.87033817	29.003323	3.217627405	0.054257367				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.692919498	0.045078166	0.086564819	0.087762732	53.2799138	29.77855011	3.09126465	0.059715824				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.070272560	0.086564819	0.092238552	58.60899571	34.7475241	3.063958085	0.048481126				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.06564819	0.086564819	0.0982618	66.97600221	38.0993389	3.04740318	0.061931309				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.042444831	0.091502562	0.09898616	61.99356236	31.7823034	3.04740318	0.061931309				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.692919498	0.015273018	0.091502562	0.102886106	71.02545602	39.50192466	3.094503452	0.069430366				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.162841435	0.091502562	0.108502227	80.1090825	47.16653424	2.98572800	0.076309931				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.194275778	0.091502562	0.115010443	91.4038838	56.88292806	2.95525935	0.084063327				48.3060276	47.1867518			0.071746038									
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.139613666	0.095745354	0.110826018	79.67796234	40.1132952	2.98430271	0.0702488																	

#	A			B			C			D			E			F			G			H			I			J			K			L			M			N		
	C.S Area(cm ²)	V (ml/m ³)	Vl(V/ml)	Vcm ³	Vl(m ³ /therop)	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	ρ (kg/s)	Eg1(measured)	start	140cmposition	l ₀ (mm)	rad.	(dmm)cal.	(dbmm)measure																									
1	38.48451001	3000	300	1000	90	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.223		0.90832008	0.87263172		0.65385224																										
30	38.48451001	3000	600	1000	90	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.197		0.90832008	0.855342914		0.614782153																										
31	38.48451001	3000	900	1000	90	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.186		0.90832008	0.901010576		0.586155394																										
32	38.48451001	3000	1200	1000	90	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.171		0.90832008	0.951226013		0.562126013																										
34	38.48451001	1500	300	1000	120	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.166		0.77962647	0.851147205		0.651147205																										
35	38.48451001	1500	600	1000	120	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.154		0.77962647	0.853788022		0.610290417																										
36	38.48451001	1500	900	1000	120	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.149		0.77962647	0.60853983		0.661371516																										
37	38.48451001	1500	1200	1000	120	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143		0.77962647	0.634276512		0.633657692																										
38	38.48451001	2000	300	1000	120	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.214		0.830815406	0.601308693		0.659158421																										
39	38.48451001	2000	600	1000	120	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.197		0.830815406	0.636875053		0.581319583																										
40	38.48451001	2000	900	1000	120	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.179		0.830815406	0.673025669		0.624132091																										
41	38.48451001	2000	1200	1000	120	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.177		0.830815406	0.692939204		0.625715977																										
42	38.48451001	2500	300	1000	120	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.263		0.872619159	0.651156556		0.634218092																										
43	38.48451001	2500	600	1000	120	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.249		0.872619159	0.679699208		0.615719097																										
44	38.48451001	2500	900	1000	120	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.240		0.872619159	0.704615641		0.621614848																										
45	38.48451001	2500	1200	1000	120	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.223		0.872619159	0.739621593		0.675496779																										
46	38.48451001	3000	300	1000	120	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.286		0.90832008	0.716011927		0.665370105																										
47	38.48451001	3000	600	1000	120	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.271		0.90832008	0.744651372		0.684022734																										
48	38.48451001	3000	900	1000	120	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.254		0.90832008	0.780444791		0.652115836																										
49	38.48451001	3000	1200	1000	120	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.223		0.90832008	0.838656628		0.676341111																										
50	38.48451001	1500	300	1000	150	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.177		0.77962647	0.536078253		0.686869505																										
51	38.48451001	1500	600	1000	150	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.171		0.77962647	0.575949144		0.643667703																										
52	38.48451001	1500	900	1000	150	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.169		0.77962647	0.576046664		0.667811313																										
53	38.48451001	1500	1200	1000	150	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.169		0.77962647	0.591120516		0.682994487																										
54	38.48451001	2000	300	1000	150	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.243		0.830815406	0.578180580		0.686051974																										
55	38.48451001	2000	600	1000	150	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.226		0.830815406	0.607251547		0.716089333																										
56	38.48451001	2000	900	1000	150	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.206		0.830815406	0.642707764		0.68765182																										
57	38.48451001	2000	1200	1000	150	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.200		0.830815406	0.664927807		0.678516603																										

#	A			B			C			D			E			F			G			H			I			J			K			L			M			N		
	C.S Area(cm ²)	V (ml/m ³)	Vl(V/ml)	Vcm ³	Vl(m ³ /therop)	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	U ₁ (m/s)	ref.	U ₂ (m/s)	U ₃ (m/s)	R ₂₀	R ₃₀	t	U ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)	U ₃ (m/s)																						
1	38.48451001	3000	300	1000	90	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.133609948	0.095745354	0.10837455	74.84184412	35.1765981	2.99860711	0.065542962	0.065542812																									
30	38.48451001	3000	600	1000	90	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.240560761	0.095745354	0.11466271	80.08917612	44.07977162	2.966642854	0.074533338	0.074533461																									
31	38.48451001	3000	900	1000	90	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.49855182	0.095745354	0.119281154	94.27507748	51.520576257	2.948461667	0.08063292	0.080634883																									
32	38.48451001	3000	1200	1000	90	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.31978018	0.095745354	0.125127503	105.59075864	69.28175566	2.92051204	0.087286847	0.087288749																									
34	38.48451001	1500	300	1000	120	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.080802839	0.080590092	0.06860031	33.1656541	18.53332821	3.217260982	0.045948978	0.045948959																									
35	38.48451001	1500	600	1000	120	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	-0.026502395	0.080590092	0.072481133	37.11702828	21.7832987	3.18642051	0.050297787	0.050297713																									
36	38.48451001	1500	900	1000	120	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	-0.052777683	0.080590092	0.075534283	40.32070911	24.282584	3.071637253	0.035388136	0.035388005																									
37	38.48451001	1500	1200	1000	120	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.000618820	0.080590092	0.078644054	43.75620751	26.9896593	3.141743386	0.056588424	0.056588213																									
38	38.48451001	2000	300	1000	120	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.057849728	0.086564819	0.079620904	42.10263454	19.7212685	3.149066717	0.04758572	0.047585684																									
39	38.48451001	2000	600	1000	120	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.055545450	0.086564819	0.083669717	46.74311142	23.5771214	3.12440325	0.02565782	0.025657822																									
40	38.48451001	2000	900	1000	120	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.048892578	0.086564819	0.087599682	51.1765216	27.0086612	3.09571865	0.057432786	0.057437086																									
41	38.48451001	2000	1200	1000	120	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.072223197	0.086564819	0.09057635	55.45339139	34.46545604	3.077210701	0.06047426	0.060474012																									
42	38.48451001	2500	300	1000	120	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.017028464	0.091502562	0.092167539	52.64517315	20.55842480	3.086578508	0.048826725	0.048826666																									
43	38.48451001	2500	600	1000	120	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.063980111	0.091502562	0.095192259	56.75623079	23.64559602	3.067493242	0.052777323	0.052776822																									
44	38.48451001	2500	900	1000	120	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.083001693	0.091502562	0.098186037	60.63783881	26.37984158	3.050177729	0.055938812	0.055938742																									
45	38.48451001	2500	1200	1000	120	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.038719194	0.091502562	0.101423555	65.80267654	30.076699502	3.030089093	0.06094193	0.060942901																									
46	38.48451001	3000	300	1000	120	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.063952162	0.095745354	0.105368857	66.27326514	23.9701871	3.020530303	0.0533458	0.053346663																									
47	38.48451001	3000	600	1000	120	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.062488639	0.095745354	0.108295598	70.90999795	27.37191335	3.009182407	0.057376808	0.057376648																									
48	38.48451001	3000	900	1000	120	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.148331155	0.095745354	0.111349784	78.82023941	31.71704253	2.99257187	0.062127358	0.062126455																									
49	38.48451001	3000	1200	1000	120	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.9527642																																	

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
C S Area(cm ²)	V (ml/mter)	Vm(red)	Vml/therpp	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jr(cm/s)	Jl(cm/s)	ρ (kg/m ³)	Eg1(measured)	start: 140cm	composition	d _v (mm)	d _m (mm)	cal.	(dbmm)measure
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.314	0.872619159	0.628588861	0.719604082	
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.280	0.872619159	0.659562049	0.750137279	
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.263	0.872619159	0.710130518	0.797302331	
61	38.48451001	2500	1200	1000	150	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.235	0.872619159	0.736317671	0.826994487	
62	38.48451001	3000	300	1000	150	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.360	0.908323008	0.691480372	0.733732926	
63	38.48451001	3000	600	1000	150	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.337	0.908323008	0.715936937	0.767704892	
64	38.48451001	3000	900	1000	150	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.286	0.908323008	0.755195886	0.745641799	
65	38.48451001	3000	1200	1000	150	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.240	0.908323008	0.814448385	0.742394186	
66	38.48451001	1500	300	1000	200	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.186	0.779862467	0.526552868	0.68696605	
67	38.48451001	1500	600	1000	200	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.171	0.779862467	0.557930434	0.643667083	
68	38.48451001	1500	900	1000	200	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.263	0.779862467	0.593336208	0.677813173	
69	38.48451001	1500	1200	1000	200	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.157	0.779862467	0.607780142	0.682994487	
70	38.48451001	2000	300	1000	200	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.243	0.830815406	0.578177707	0.686051974	
71	38.48451001	2000	600	1000	200	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.223	0.830815406	0.609625522	0.716869792	
72	38.48451001	2000	900	1000	200	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.211	0.830815406	0.636467192	0.68763182	
73	38.48451001	2000	1200	1000	200	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.206	0.830815406	0.658481548	0.678516603	
74	38.48451001	2500	300	1000	200	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.297	0.872619159	0.633542229	0.719604082	
75	38.48451001	2500	600	1000	200	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.263	0.872619159	0.669144386	0.750137279	
76	38.48451001	2500	900	1000	200	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.229	0.872619159	0.716176203	0.797302331	
77	38.48451001	2500	1200	1000	200	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.226	0.872619159	0.736317655	0.826994487	
78	38.48451001	3000	300	1000	200	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.414	0.908323008	0.696857990	0.745641799	
79	38.48451001	3000	600	1000	200	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.343	0.908323008	0.715972942	0.767704892	
80	38.48451001	3000	900	1000	200	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.300	0.908323008	0.747671614	0.745641799	
81	38.48451001	3000	1200	1000	200	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.280	0.908323008	0.777811857	0.742394186	

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
C S Area(cm ²)	V (ml/mter)	Vm(red)	Vml/therpp	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jr(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	U ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)	U ₃ (m/s)	U ₄ (m/s)	U ₅ (m/s)	U ₆ (m/s)	U ₇ (m/s)	U ₈ (m/s)	U ₉ (m/s)	U ₁₀ (m/s)	U ₁₁ (m/s)	U ₁₂ (m/s)	U ₁₃ (m/s)	U ₁₄ (m/s)	U ₁₅ (m/s)	U ₁₆ (m/s)	U ₁₇ (m/s)	U ₁₈ (m/s)	U ₁₉ (m/s)	U ₂₀ (m/s)	U ₂₁ (m/s)	U ₂₂ (m/s)	U ₂₃ (m/s)	U ₂₄ (m/s)	U ₂₅ (m/s)	U ₂₆ (m/s)	U ₂₇ (m/s)	U ₂₈ (m/s)	U ₂₉ (m/s)	U ₃₀ (m/s)	U ₃₁ (m/s)	U ₃₂ (m/s)	U ₃₃ (m/s)	U ₃₄ (m/s)	U ₃₅ (m/s)	U ₃₆ (m/s)	U ₃₇ (m/s)	U ₃₈ (m/s)	U ₃₉ (m/s)	U ₄₀ (m/s)	U ₄₁ (m/s)	U ₄₂ (m/s)	U ₄₃ (m/s)	U ₄₄ (m/s)	U ₄₅ (m/s)	U ₄₆ (m/s)	U ₄₇ (m/s)	U ₄₈ (m/s)	U ₄₉ (m/s)	U ₅₀ (m/s)	U ₅₁ (m/s)	U ₅₂ (m/s)	U ₅₃ (m/s)	U ₅₄ (m/s)	U ₅₅ (m/s)	U ₅₆ (m/s)	U ₅₇ (m/s)	U ₅₈ (m/s)	U ₅₉ (m/s)	U ₆₀ (m/s)	U ₆₁ (m/s)	U ₆₂ (m/s)	U ₆₃ (m/s)	U ₆₄ (m/s)	U ₆₅ (m/s)	U ₆₆ (m/s)	U ₆₇ (m/s)	U ₆₈ (m/s)	U ₆₉ (m/s)	U ₇₀ (m/s)	U ₇₁ (m/s)	U ₇₂ (m/s)	U ₇₃ (m/s)	U ₇₄ (m/s)	U ₇₅ (m/s)	U ₇₆ (m/s)	U ₇₇ (m/s)	U ₇₈ (m/s)	U ₇₉ (m/s)	U ₈₀ (m/s)	U ₈₁ (m/s)	U ₈₂ (m/s)	U ₈₃ (m/s)	U ₈₄ (m/s)	U ₈₅ (m/s)	U ₈₆ (m/s)	U ₈₇ (m/s)	U ₈₈ (m/s)	U ₈₉ (m/s)	U ₉₀ (m/s)	U ₉₁ (m/s)	U ₉₂ (m/s)	U ₉₃ (m/s)	U ₉₄ (m/s)	U ₉₅ (m/s)	U ₉₆ (m/s)	U ₉₇ (m/s)	U ₉₈ (m/s)	U ₉₉ (m/s)	U ₁₀₀ (m/s)	U ₁₀₁ (m/s)	U ₁₀₂ (m/s)	U ₁₀₃ (m/s)	U ₁₀₄ (m/s)	U ₁₀₅ (m/s)	U ₁₀₆ (m/s)	U ₁₀₇ (m/s)	U ₁₀₈ (m/s)	U ₁₀₉ (m/s)	U ₁₁₀ (m/s)	U ₁₁₁ (m/s)	U ₁₁₂ (m/s)	U ₁₁₃ (m/s)	U ₁₁₄ (m/s)	U ₁₁₅ (m/s)	U ₁₁₆ (m/s)	U ₁₁₇ (m/s)	U ₁₁₈ (m/s)	U ₁₁₉ (m/s)	U ₁₂₀ (m/s)	U ₁₂₁ (m/s)	U ₁₂₂ (m/s)	U ₁₂₃ (m/s)	U ₁₂₄ (m/s)	U ₁₂₅ (m/s)	U ₁₂₆ (m/s)	U ₁₂₇ (m/s)	U ₁₂₈ (m/s)	U ₁₂₉ (m/s)	U ₁₃₀ (m/s)	U ₁₃₁ (m/s)	U ₁₃₂ (m/s)	U ₁₃₃ (m/s)	U ₁₃₄ (m/s)	U ₁₃₅ (m/s)	U ₁₃₆ (m/s)	U ₁₃₇ (m/s)	U ₁₃₈ (m/s)	U ₁₃₉ (m/s)	U ₁₄₀ (m/s)	U ₁₄₁ (m/s)	U ₁₄₂ (m/s)	U ₁₄₃ (m/s)	U ₁₄₄ (m/s)	U ₁₄₅ (m/s)	U ₁₄₆ (m/s)	U ₁₄₇ (m/s)	U ₁₄₈ (m/s)	U ₁₄₉ (m/s)	U ₁₅₀ (m/s)	U ₁₅₁ (m/s)	U ₁₅₂ (m/s)	U ₁₅₃ (m/s)	U ₁₅₄ (m/s)	U ₁₅₅ (m/s)	U ₁₅₆ (m/s)	U ₁₅₇ (m/s)	U ₁₅₈ (m/s)	U ₁₅₉ (m/s)	U ₁₆₀ (m/s)	U ₁₆₁ (m/s)	U ₁₆₂ (m/s)	U ₁₆₃ (m/s)	U ₁₆₄ (m/s)	U ₁₆₅ (m/s)	U ₁₆₆ (m/s)	U ₁₆₇ (m/s)	U ₁₆₈ (m/s)	U ₁₆₉ (m/s)	U ₁₇₀ (m/s)	U ₁₇₁ (m/s)	U ₁₇₂ (m/s)	U ₁₇₃ (m/s)	U ₁₇₄ (m/s)	U ₁₇₅ (m/s)	U ₁₇₆ (m/s)	U ₁₇₇ (m/s)	U ₁₇₈ (m/s)	U ₁₇₉ (m/s)	U ₁₈₀ (m/s)	U ₁₈₁ (m/s)	U ₁₈₂ (m/s)	U ₁₈₃ (m/s)	U ₁₈₄ (m/s)	U ₁₈₅ (m/s)	U ₁₈₆ (m/s)	U ₁₈₇ (m/s)	U ₁₈₈ (m/s)	U ₁₈₉ (m/s)	U ₁₉₀ (m/s)	U ₁₉₁ (m/s)	U ₁₉₂ (m/s)	U ₁₉₃ (m/s)	U ₁₉₄ (m/s)	U ₁₉₅ (m/s)	U ₁₉₆ (m/s)	U ₁₉₇ (m/s)	U ₁₉₈ (m/s)	U ₁₉₉ (m/s)	U ₂₀₀ (m/s)	U ₂₀₁ (m/s)	U ₂₀₂ (m/s)	U ₂₀₃ (m/s)	U ₂₀₄ (m/s)	U ₂₀₅ (m/s)	U ₂₀₆ (m/s)	U ₂₀₇ (m/s)	U ₂₀₈ (m/s)	U ₂₀₉ (m/s)	U ₂₁₀ (m/s)	U ₂₁₁ (m/s)	U ₂₁₂ (m/s)	U ₂₁₃ (m/s)	U ₂₁₄ (m/s)	U ₂₁₅ (m/s)	U ₂₁₆ (m/s)	U ₂₁₇ (m/s)	U ₂₁₈ (m/s)	U ₂₁₉ (m/s)	U ₂₂₀ (m/s)	U ₂₂₁ (m/s)	U ₂₂₂ (m/s)	U ₂₂₃ (m/s)	U ₂₂₄ (m/s)	U ₂₂₅ (m/s)	U ₂₂₆ (m/s)	U ₂₂₇ (m/s)	U ₂₂₈ (m/s)	U ₂₂₉ (m/s)	U ₂₃₀ (m/s)	U ₂₃₁ (m/s)	U ₂₃₂ (m/s)	U ₂₃₃ (m/s)	U ₂₃₄ (m/s)	U ₂₃₅ (m/s)	U ₂₃₆ (m/s)	U ₂₃₇ (m/s)	U ₂₃₈ (m/s)	U ₂₃₉ (m/s)	U ₂₄₀ (m/s)	U ₂₄₁ (m/s)	U ₂₄₂ (m/s)	U ₂₄₃ (m/s)	U ₂₄₄ (m/s)	U ₂₄₅ (m/s)	U ₂₄₆ (m/s)	U ₂₄₇ (m/s)	U ₂₄₈ (m/s)	U ₂₄₉ (m/s)	U ₂₅₀ (m/s)	U ₂₅₁ (m/s)	U ₂₅₂ (m/s)	U ₂₅₃ (m/s)	U ₂₅₄ (m/s)	U ₂₅₅ (m/s)	U ₂₅₆ (m/s)	U ₂₅₇ (m/s)	U ₂₅₈ (m/s)	U ₂₅₉ (m/s)	U ₂₆₀ (m/s)	U ₂₆₁ (m/s)	U ₂₆₂ (m/s)	U ₂₆₃ (m/s)	U ₂₆₄ (m/s)	U ₂₆₅ (m/s)	U ₂₆₆ (m/s)	U ₂₆₇ (m/s)	U ₂₆₈ (m/s)	U ₂₆₉ (m/s)	U ₂₇₀ (m/s)	U ₂₇₁ (m/s)	U ₂₇₂ (m/s)	U ₂₇₃ (m/s)	U ₂₇₄ (m/s)	U ₂₇₅ (m/s)	U ₂₇₆ (m/s)	U ₂₇₇ (m/s)	U ₂₇₈ (m/s)	U ₂₇₉ (m/s)	U ₂₈₀ (m/s)	U ₂₈₁ (m/s)	U ₂₈₂ (m/s)	U ₂₈₃ (m/s)	U ₂₈₄ (m/s)	U ₂₈₅ (m/s)	U ₂₈₆ (m/s)	U ₂₈₇ (m/s)	U ₂₈₈ (m/s)	U ₂₈₉ (m/s)	U ₂₉₀ (m/s)	U ₂₉₁ (m/s)	U ₂₉₂ (m/s)	U ₂₉₃ (m/s)	U ₂₉₄ (m/s)	U ₂₉₅ (m/s)	U ₂₉₆ (m/s)	U ₂₉₇ (m/s)	U ₂₉₈ (m/s)	U ₂₉₉ (m/s)	U ₃₀₀ (m/s)	U ₃₀₁ (m/s)	U ₃₀₂ (m/s)	U ₃₀₃ (m/s)	U ₃₀₄ (m/s)	U ₃₀₅ (m/s)	U ₃₀₆ (m/s)	U ₃₀₇ (m/s)	U ₃₀₈ (m/s)	U ₃₀₉ (m/s)	U ₃₁₀ (m/s)	U ₃₁₁ (m/s)	U ₃₁₂ (m/s)	U ₃₁₃ (m/s)	U ₃₁₄ (m/s)	U ₃₁₅ (m/s)	U ₃₁₆ (m/s)	U ₃₁₇ (m/s)	U ₃₁₈ (m/s)	U ₃₁₉ (m/s)	U ₃₂₀ (m/s)	U ₃₂₁ (m/s)	U ₃₂₂ (m/s)	U ₃₂₃ (m/s)	U ₃₂₄ (m/s)	U ₃₂₅ (m/s)	U ₃₂₆ (m/s)	U ₃₂₇ (m/s)	U ₃₂₈ (m/s)	U ₃₂₉ (m/s)	U ₃₃₀ (m/s)	U ₃₃₁ (m/s)	U ₃₃₂ (m/s)	U ₃₃₃ (m/s)	U ₃₃₄ (m/s)	U ₃₃₅ (m/s)	U ₃₃₆ (m/s)	U ₃₃₇ (m/s)	U ₃₃₈ (m/s)	U ₃₃₉ (m/s)	U ₃₄₀ (m/s)	U ₃₄₁ (m/s)	U ₃₄₂ (m/s)	U ₃₄₃ (m/s)	U ₃₄₄ (m/s)	U ₃₄₅ (m/s)	U ₃₄₆ (m/s)	U ₃₄₇ (m/s)	U ₃₄₈ (m/s)	U ₃₄₉ (m/s)	U ₃₅₀ (m/s)	U ₃₅₁ (m/s)	U ₃₅₂ (m/s)	U ₃₅₃ (m/s)	U ₃₅₄ (m/s)	U ₃₅₅ (m/s)	U ₃₅₆ (m/s)	U ₃₅₇ (m/s)	U ₃₅₈ (m/s)	U ₃₅₉ (m/s)	U ₃₆₀ (m/s)	U ₃₆₁ (m/s)	U ₃₆₂ (m/s)	U ₃₆₃ (m/s)	U ₃₆₄ (m/s)	U ₃₆₅ (m/s)	U ₃₆₆ (m/s)	U ₃₆₇ (m/s)	U ₃₆₈ (m/s)	U ₃₆₉ (m/s)	U ₃₇₀ (m/s)	U ₃₇₁ (m/s)	U ₃₇₂ (m/s)	U ₃₇₃ (m/s)	U ₃₇₄ (m/s)	U ₃₇₅ (m/s)	U ₃₇₆ (m/s)	U ₃₇₇ (m/s)	U ₃₇₈ (m/s)	U ₃₇₉ (m/s)	U ₃₈₀ (m/s)	U ₃₈₁ (m/s)	U ₃₈₂ (m/s)	U ₃₈₃ (m/s)	U ₃₈₄ (m/s)	U ₃₈₅ (m/s)	U ₃₈₆ (m/s)	U ₃₈₇ (m/s)	U ₃₈₈ (m/s)	U ₃₈₉ (m/s)	U ₃₉₀ (m/s)	U ₃₉₁ (m/s)	U ₃₉₂ (m/s)	U ₃₉₃ (m/s)	U ₃₉₄ (m/s)	U ₃₉₅ (m/s)	U ₃₉₆ (m/s)	U ₃₉₇ (m/s)	U ₃₉₈

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
C	S Area(cm ²)	V (m ³ /r)	z (iter)	Vm ² (-)	led Vm ² (-)	rothep(r)	Jg (cm/s ²)	Jw(cm/s ²)	Jf(cm/s ²)	Jl(cm/s ²)	ρ (kg/m ³)	Eg (measured)(stair: 140cmposition)	d _g (mm)ref.(-)	(dbm)cal.(-)	(dbm)measure(-)
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.129	0.779862467	0.627413949	0.627472376	
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.126	0.779862467	0.644036923	0.641036923	
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.123	0.779862467	0.671727131	0.671685819	
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.120	0.779862467	0.695216525	0.695216724	
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.134	0.830815406	0.76449140	0.755281777	
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.137	0.830815406	0.768634670	0.678910776	
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.140	0.830815406	0.77342670	0.78888143	
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143	0.830815406	0.778927994	0.805322553	
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.151	0.872619159	0.949331594	0.671489927	
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.149	0.872619159	0.957393247	0.761072736	
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.146	0.872619159	0.901992925	0.844178725	
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143	0.872619159	0.929170402	0.800005556	
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.149	0.908332008	1.007916904	0.844543500	
14	38.48451001	3000	600	1000	60	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.151	0.908332008	1.009955667	0.878746733	
15	38.48451001	3000	900	1000	60	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.150	0.908332008	1.009976681	0.903015010	
16	38.48451001	3000	1200	1000	60	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.160	0.908332008	1.003977449	0.873893960	
17	38.48451001	3500	300	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.140	0.779862467	0.58627089	0.61046627	
18	38.48451001	3500	600	1000	90	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.137	0.779862467	0.618925090	0.594870474	
19	38.48451001	3500	900	1000	90	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.134	0.779862467	0.639611999	0.617235294	
20	38.48451001	3500	1200	1000	90	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.129	0.779862467	0.669068996	0.645774070	
21	38.48451001	2000	300	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.154	0.830815406	0.701972621	0.630253890	
22	38.48451001	2000	600	1000	90	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.151	0.830815406	0.72435456	0.671489927	
23	38.48451001	2000	900	1000	90	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.149	0.830815406	0.74707262	0.661086613	
24	38.48451001	2000	1200	1000	90	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143	0.830815406	0.778928663	0.680421418	
25	38.48451001	2500	300	1000	90	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.174	0.872619159	0.775822126	0.706837248	
26	38.48451001	2500	600	1000	90	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.169	0.872619159	0.809429262	0.717398376	
27	38.48451001	2500	900	1000	90	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.154	0.872619159	0.869629277	0.678813139	
28	38.48451001	2500	1200	1000	90	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.151	0.872619159	0.895264633	0.720483451	

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
C	S Area(cm ²)	V (m ³ /r)	z (iter)	Vm ² (-)	led Vm ² (-)	rothep(r)	Jg (cm/s ²)	Jw(cm/s ²)	Jf(cm/s ²)	Jl(cm/s ²)	M-N	U _g (m/s)ref.(-)	U _g (m/s)QZ(air)	Re _g	Re _g	Re _g	m	z	U _{st} (m/s)	U _{st} (m/s)2(-)	
1	38.48451001	1500	300	1000	60	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.047358427	0.080590092	0.076556711	42.1338961	27.306081	31.5263253		0.056896001	0.056896001		
2	38.48451001	1500	600	1000	60	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.008520900	0.080590092	0.079306133	45.1827787	29.6015678	31.133851428		0.059599232	0.05960037		
3	38.48451001	1500	900	1000	60	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883		0.064485409	0.080590092	0.082007028	48.30916005	32.19807239	31.15715032		0.06225633	0.06225638		
4	38.48451001	1500	1200	1000	60	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.000749209	0.080590092	0.084958071	51.75535327	34.8657371	31.09814311		0.06491131	0.06491131		
5	38.48451001	2000	300	1000	60	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078		0.009161962	0.086564819	0.095232405	63.8632341	41.12920534	30.43389589		0.0700375	0.071004329		
6	38.48451001	2000	600	1000	60	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.089725694	0.086564819	0.09607726	67.9737334	41.49593704	30.93611881		0.07187247	0.07187247		
7	38.48451001	2000	900	1000	60	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883		-0.015414473	0.086564819	0.097006412	68.1737574	41.6253447	30.35457459		0.07143574	0.07143574		
8	38.48451001	2000	1200	1000	60	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285		-0.026394559	0.086564819	0.09802126	66.9750021	42.01879499	30.30828383		0.071746038	0.071746229		
9	38.48451001	2500	300	1000	60	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078		0.17841673	0.091502562	0.108131256	80.56072690	49.2662028	2.98507568		0.081732823	0.081733138		
10	38.48451001	2500	600	1000	60	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.000749209	0.091502562	0.11125659	85.3215001	52.8645026	2.971486866		0.081041658	0.081041658		
11	38.48451001	2500	900	1000	60	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883		0.057820500	0.091502562	0.114140235	80.9310792	56.3381612	2.958275703		0.083933956	0.083934748		
12	38.48451001	2500	1200	1000	60	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.129164846	0.091502562	0.117175239	95.0512948	60.7130007	2.945254797		0.086306351	0.086303867		
13	38.48451001	3000	300	1000	60	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078		0.16373404	0.090654354	0.127691878	112.897186	70.8660586	2.9095422		0.094601653	0.094603969		
14	38.48451001	3000	600	1000	60	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.131108934	0.095746534	0.128843754	113.6918134	70.6211124	2.905171809		0.093983531	0.093982929		
15	38.48451001	3000	900	1000	60	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883		0.096475301	0.095746534	0.127952964	112.2368587	68.84019134	2.90761128		0.092440423	0.09244167		
16	38.48451001	3000	1200	1000	60	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.130083489	0.095746534	0.12886749	113.4912951	68.84109106	2.904902085		0.092543934	0.09254335		
17	38.48451001	3500	300	1000	90	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078		-0.012179338	0.080590092	0.077345605	38.8434994	23.8642695	31.7652227		0.05247336	0.05246978		
18	38.48451001	3500	600	1000	90	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.034617995	0.080590092	0.076800044	41.3069362	25.9528682	31.56566209		0.055398066	0.055397116		
19	38.48451001	3500	900	1000	90	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883		0.022729905	0.080590092	0.078717217	44.1894425	28.1099143	31.39473727		0.05780137	0.057879828		
20	38.48451001	3500	1200	1000	90	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0.000749209	0.080590092	0.084958071	51.75535327	34.8657371	31.09814311		0.06491131	0.06491131		
21	38.48451001	2000	300	1000	90	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078		0.071719240	0.086564819	0.088991836	54.7528363	38.17924703	30.81697301		0.062798037	0.062798275		
22	38.48451001	2000	600	1000	90	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948		0.050496472	0.086564819	0.091668133	58.24508099	35.24273167	30.6858718		0.06536246	0.065364471		
23	38.48451001	2000	900	1000	90	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883		0.08593649	0.086564819	0.094420373	61.37620106	37.92065689	30.0558672		0.067962764	0.067963145		
24	38.48451001	2000	1200	1000	90	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285		0										

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		M		N
												area(cm²)	r V (m/s)	iter V(m/s)	ed V(m/s)	
30	38.48451001	3000	300	1000	90	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.173	0.908332008	0.93028675	0.75137500		
31	38.48451001	3000	600	1000	90	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.562997078	1000	0.173	0.908332008	0.93028675	0.75137500		
32	38.48451001	3000	900	1000	90	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.164	0.908332008	0.97626237	0.743894035		
33	38.48451001	3000	1200	1000	90	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.157	0.908332008	1.019544004	0.78457891		
34	38.48451001	1500	300	1000	120	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.154	0.779862467	0.569483665	0.60174913		
35	38.48451001	1500	600	1000	120	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.151	0.779862467	0.588912081	0.605493899		
36	38.48451001	1500	900	1000	120	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.151	0.779862467	0.630207940	0.624406313		
37	38.48451001	1500	1200	1000	120	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.140	0.779862467	0.640488962	0.605250842		
38	38.48451001	2000	300	1000	120	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.177	0.830815406	0.652161597	0.610355485		
39	38.48451001	2000	600	1000	120	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.177	0.830815406	0.671666439	0.608416405		
40	38.48451001	2000	900	1000	120	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.166	0.830815406	0.693170076	0.58608719		
41	38.48451001	2000	1200	1000	120	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.171	0.830815406	0.719841199	0.608105824		
42	38.48451001	2500	300	1000	120	1.082866868	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.189	0.872619159	0.734045918	0.588308352		
43	38.48451001	2500	600	1000	120	1.082866868	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.189	0.872619159	0.716130523	0.675025127		
44	38.48451001	2500	900	1000	120	1.082866868	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.183	0.872619159	0.789396685	0.664173353		
45	38.48451001	2500	1200	1000	120	1.082866868	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.177	0.872619159	0.81943973	0.681951474		
46	38.48451001	3000	300	1000	120	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.211	0.908332008	0.90779230	0.76019188		
47	38.48451001	3000	600	1000	120	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.203	0.908332008	0.842634964	0.724185455		
48	38.48451001	3000	900	1000	120	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.200	0.908332008	0.865322472	0.676034500		
49	38.48451001	3000	1200	1000	120	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.191	0.908332008	0.902321252	0.628254372		
50	38.48451001	1500	300	1000	150	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.151	0.779862467	0.57468827	0.621738758		
51	38.48451001	1500	600	1000	150	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.149	0.779862467	0.594077331	0.594077331		
52	38.48451001	1500	900	1000	150	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.146	0.779862467	0.61147327	0.60607348		
53	38.48451001	1500	1200	1000	150	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.143	0.779862467	0.634276512	0.657606797		
54	38.48451001	2000	300	1000	150	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.183	0.830815406	0.642304789	0.635663561		
55	38.48451001	2000	600	1000	150	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.189	0.830815406	0.648760250	0.607049503		
56	38.48451001	2000	900	1000	150	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.191	0.830815406	0.660266652	0.662504748		
57	38.48451001	2000	1200	1000	150	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.194	0.830815406	0.672034538	0.653117313		

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	O	P	Q	R	S	T	U	V
30	38.48451001	3000	300	1000	90	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.128148175	0.095745354	0.118034895	93.52546017	54.23137364	2.94811947	0.081363945	0.08136317
31	38.48451001	3000	600	1000	90	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.126373539	0.095745354	0.120986511	98.5199076	56.8193338	3.16790479	0.081450889	0.081451105
32	38.48451001	3000	900	1000	90	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.124320622	0.095745354	0.125843213	107.7971461	64.2512524	3.916250791	0.080866035	0.080865912
33	38.48451001	3000	1200	1000	90	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.231365514	0.095745354	0.129932167	115.7928125	70.59322125	2.900658637	0.039818676	0.039818676
34	38.48451001	1500	300	1000	120	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.031591048	0.008090092	0.070442955	35.19958462	20.6045582	3.20133706	0.048716452	0.048716294
35	38.48451001	1500	600	1000	120	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	-0.016581908	0.008090092	0.07294178	37.70802941	22.3048484	3.18274161	0.05106424	0.051064462
36	38.48451001	1500	900	1000	120	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	-0.021198372	0.008090092	0.075009588	39.68908367	23.61569944	3.16789044	0.05295966	0.052959653
37	38.48451001	1500	1200	1000	120	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	-0.035398089	0.008090092	0.077624054	44.35260782	26.38999875	3.141743387	0.053799513	0.053799444
38	38.48451001	2000	300	1000	120	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.041808112	0.086564819	0.1084093565	48.1079006	26.27435768	3.116469499	0.055737306	0.055737306
39	38.48451001	2000	600	1000	120	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.085903504	0.086564819	0.086258844	50.4967172	27.6978622	3.101784941	0.057316424	0.057316116
40	38.48451001	2000	900	1000	120	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.107161357	0.086564819	0.089351542	54.2396235	30.4833217	3.08239148	0.060466229	0.060466011
41	38.48451001	2000	1200	1000	120	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.111735375	0.086564819	0.092480883	58.3960625	33.5507696	3.064248876	0.063887753	0.063887752
42	38.48451001	2500	300	1000	120	1.082866868	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.045737566	0.091902562	0.097440843	62.74215158	35.5802163	3.04497476	0.0662714073	0.066271489
43	38.48451001	2500	600	1000	120	1.082866868	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.069278788	0.091902562	0.10064431	67.21180991	35.7958462	3.02767682	0.069594704	0.069594634
44	38.48451001	2500	900	1000	120	1.082866868	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.125232332	0.091902562	0.103875341	71.92881538	39.2004561	3.010283407	0.069297912	0.069297909
45	38.48451001	2500	1200	1000	120	1.082866868	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.136484558	0.091902562	0.107145956	76.92325424	42.9964414	2.99464624	0.070291142	0.070291142
46	38.48451001	3000	300	1000	120	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.047780302	0.095745354	0.109911265	77.8999479	38.3349803	2.89894562	0.06858204	0.068582091
47	38.48451001	3000	600	1000	120	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.118182040	0.095745354	0.113625386	83.96012647	42.84488662	2.97818696	0.072738973	0.072738879
48	38.48451001	3000	900	1000	120	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.189979792	0.095745354	0.114404746	88.5783149	45.69311009	2.959789745	0.075368205	0.075368205
49	38.48451001	3000	1200	1000	120	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.274063820	0.095745354	0.120239483	95.11073753	50.97744201	2.94283583	0.079652616	0.079652673
50	38.48451001	1500	300	1000	150	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.047070031	0.008090092	0.070976022	35.71768458	21.1881847	3.19794869	0.049353552	0.049353343
51	38.48451001	1500	600	1000	150	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	-0.050051302	0.008090092	0.073359503	38.3777689	23.0200448	3.17764478	0.051862202	0.051861991
52	38.48451001	1500	900	1000	150	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	-0.049590021	0.008090092	0.076094394	40.9954282	24.9510963	3.155949099	0.054213145	0.054212933
53	38.48451001	1500	1200	1000	150	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	-0.023330285	0.008090092	0.077644054	43.5260782	26.38999875	3.141743387	0.05588024	0.055882133
54	38.48451001	2000	300	1000	150	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.066641208	0.086564819	0					

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	C S Area[cm²]	r V (ml/r)²	iter V(ml)²	ed V(m)²	oether[°]	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	p (1/ka/s)	Eg[measured]:start: 140cm:position	u _h (mm/s)	(d _m)cal.	(d _m)measure
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.217	0.872619159	0.096840677	0.639938066
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.562997078	1000	0.214	0.872619159	0.171325160	0.600732869
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.209	0.872619159	0.242095617	0.624313127
61	38.48451001	2500	1200	1000	150	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.206	0.872619159	0.316666933	0.616660993
62	38.48451001	3000	300	1000	150	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.240	0.908332008	0.71657971	0.679349339
63	38.48451001	3000	600	1000	150	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.237	0.908332008	0.782972619	0.701166349
64	38.48451001	3000	900	1000	150	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.223	0.908332008	0.821457064	0.637794183
65	38.48451001	3000	1200	1000	150	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.211	0.908332008	0.89519967	0.708847117
66	38.48451001	1500	300	1000	200	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.154	0.779862467	0.568085169	0.618010710
67	38.48451001	1500	600	1000	200	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.154	0.779862467	0.58379115	0.655058166
68	38.48451001	1500	900	1000	200	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.151	0.779862467	0.603198518	0.667995000
69	38.48451001	1500	1200	1000	200	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.149	0.779862467	0.622819986	0.672688525
70	38.48451001	2000	300	1000	200	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.186	0.830815406	0.763098146	0.727096727
71	38.48451001	2000	600	1000	200	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.183	0.830815406	0.675385949	0.658280741
72	38.48451001	2000	900	1000	200	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.180	0.830815406	0.677712951	0.661066282
73	38.48451001	2000	1200	1000	200	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.177	0.830815406	0.697936658	0.690684633
74	38.48451001	2500	300	1000	200	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.211	0.872619159	0.702121025	0.709213095
75	38.48451001	2500	600	1000	200	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.209	0.872619159	0.725705046	0.657231733
76	38.48451001	2500	900	1000	200	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.206	0.872619159	0.746487419	0.728830071
77	38.48451001	2500	1200	1000	200	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.203	0.872619159	0.776384419	0.681928634
78	38.48451001	3000	300	1000	200	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	1000	0.220	0.908332008	0.792424809	0.707305303
79	38.48451001	3000	600	1000	200	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	1000	0.226	0.908332008	0.799782578	0.701147707
80	38.48451001	3000	900	1000	200	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	1000	0.229	0.908332008	0.81247771	0.682808802
81	38.48451001	3000	1200	1000	200	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	1000	0.231	0.908332008	0.825780220	0.660769634

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	C S Area[cm²]	r V (ml/r)²	iter V(ml)²	ed V(m)²	oether[°]	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	M-N	U _h (m/s) ref.	U _h (m/s) 0.6g.	Re _h	Re _s	m	Us1 (m/s) U2	Us2 (m/s) U2
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.057242311	0.091502562	0.094478228	57.75111606	27.30286653	3.064587028	0.05705214	0.067552276
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.16520468	0.091502562	0.097039559	61.15735537	29.32967296	3.349490856	0.050334554	0.059341189
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.117763891	0.091502562	0.103044314	65.20309682	32.09966637	3.103292723	0.06230555	0.062306383
61	38.48451001	2500	1200	1000	150	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.146206618	0.091502562	0.1028168	68.80316368	34.35004607	3.020549336	0.064625937	0.064625977
62	38.48451001	3000	300	1000	150	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.082306832	0.094574354	0.106722265	71.3038991	31.24900049	3.009619781	0.061542191	0.061542391
63	38.48451001	3000	600	1000	150	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.081806270	0.094574354	0.109535222	75.2308046	33.461481782	2.99645633	0.063689769	0.063870474
64	38.48451001	3000	900	1000	150	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.183662881	0.095745354	0.113293563	81.83666453	38.57934449	2.977373771	0.068888503	0.068888642
65	38.48451001	3000	1200	1000	150	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.149676259	0.095745354	0.117001672	88.11251861	43.632909297	2.958691419	0.075319441	0.075318111
66	38.48451001	1500	300	1000	200	0.649612013	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.048252541	0.080590092	0.070043218	35.18979634	20.6005434	3.201335876	0.048761542	0.048761489
67	38.48451001	1500	600	1000	200	0.649612013	0.259844805	0.433074675	0.69291948	-0.071269051	0.080590092	0.07481353	37.11739031	21.08330604	3.18641811	0.052092787	0.052092787
68	38.48451001	1500	900	1000	200	0.649612013	0.389767208	0.433074675	0.822841883	-0.066596482	0.080590092	0.075007702	39.68818851	23.51533055	3.167969042	0.052595606	0.052595131
69	38.48451001	1500	1200	1000	200	0.649612013	0.51968961	0.433074675	0.952764285	-0.049866539	0.080590092	0.077525244	42.35462407	25.44007343	3.1503202	0.054914807	0.054913912
70	38.48451001	2000	300	1000	200	0.86614935	0.129922403	0.433074675	0.562997078	-0.134398581	0.086548119	0.082773914	46.3024304	24.32932422	3.12857311	0.053352801	0.053352568
71	38.48451001	2000	600	1000	200	0.86614935	0.259844805	0.433074675	0.69291948	-0.00065192	0.086548119	0.085396307	49.26327327	26.32587333	3.10807114	0.055847326	0.055840712
72	38.48451001	2000	900	1000	200	0.86614935	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.016266669	0.086548119	0.087996253	52.3125368	28.3488122	3.092321872	0.058154065	0.058153778
73	38.48451001	2000	1200	1000	200	0.86614935	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.007070225	0.086548119	0.090574666	55.04326564	30.64580664	3.07721039	0.060474262	0.060474096
74	38.48451001	2500	300	1000	200	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.004199980	0.091502562	0.095084197	58.00391405	28.84552324	3.060280392	0.05834761	0.058473059
75	38.48451001	2500	600	1000	200	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.016520468	0.091502562	0.097039559	62.25424731	30.56367819	3.045706899	0.060664066	0.060664003
76	38.48451001	2500	900	1000	200	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.017652718	0.091502562	0.100474178	65.79220426	32.76173168	3.031813882	0.062990123	0.062989927
77	38.48451001	2500	1200	1000	200	1.082866688	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.08455785	0.091502562	0.103128053	69.4025326	35.02400746	3.018480327	0.065324119	0.065323948
78	38.48451001	3000	300	1000	200	1.299224025	0.129922403	0.433074675	0.562997078	0.084811876	0.095745354	0.1087238	75.54801159	35.9194481	2.996456332	0.066273549	0.066273389
79	38.48451001	3000	600	1000	200	1.299224025	0.259844805	0.433074675	0.69291948	0.09856031	0.095745354	0.11053835	77.53934704	36.1254085	2.989370219	0.066507903	0.066509576
80	38.48451001	3000	900	1000	200	1.299224025	0.389767208	0.433074675	0.822841883	0.130459869	0.095745354	0.112793822	80.36979707	37.11862885	2.980769896	0.067507572	0.067507386
81	38.48451001	3000	1200	1000	200	1.299224025	0.51968961	0.433074675	0.952764285	0.165010586	0.095745354	0.1175048054	83.33719961	38.15959286	2.971773757	0.068355801	0.068355384

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	W	X	Y	Z	AA	AB
1	C S Area[cm²]	r V (ml/r)²	iter V(ml)²	ed V(m)²	oether[°]	Jg (cm/s)	Jw(cm/s)	Jf(cm/s)	Jl(cm/s)	meanUg(cm/s)	U _h (cm/s)ref.	U _h (cm/s)0.2E	Sb(cm²/s)cm²	Us1-Ub2	H
58	38.48451001	2500	300	1000	150	1.082866688	0.129922403	0.433074675	0.562997078	5.705220803	9.150256156	9.447822779	93.22245879	-1.36749E-07	7.6
59	38.48451001	2500	600	1000	150	1.082866688	0.259844805	0.433074675	0.69291948	5.934427147	9.150256156	9.719355874	90.56032723	1.64957E-07	7.5
60	38.48451001	2500	900	1000	150	1.082866688	0.389767208	0.433074675	0.822841883	6.23064688	9.150256156	10.01643137			

Nomenclature

Cr	Carrying rate	운송율
d_b	Bubble size	기포크기
d_c	Column diameter	컬럼직경
ϵ_g	Gas holdup	가스홀드업
g	Gravitational acceleration	중력가속도
H_f	Froth zone height	세척대 높이
H_C	Collection zone height	포집대 높이
J_B	Bias rate	바이어스 속도
J_F	Feed rate	급광 속도
J_g	Superficial gas rate	가스 속도
J_l	Slurry rate	슬러리 속도
J_W	Superficial wash water rate	세척수 속도
P	Pressure	압력
ρ_{sl}	Slurry density	슬러리 밀도
Q_F	Volume flowrate of feed	급광유량
Q_T	Volume flowrate of tailing	광미유량
Φ_{sF}	Volume fraction solids in a slurry of feed	광액 고체 부피분율
Φ_{sT}	Volume fraction solids in a slurry of tail	광미 고체 부피분율
Re_b	Bubble Reynold number	기포 레이놀즈 수
R_W	Water recovery	물 회수율
S_b	Bubble surface area rate	기포 표면적 비
U_s	Slip velocity	상대속도(미끌림속도)
μ_l	Liquid viscosity	액체 점도

Glossary

가스홀드업(Gas holdup): 컬럼의 내부에 가스가 내포되어 있는 비율.

겉보기 속도(Superficial rate): 단위 컬럼 단면적 당 종 또는 상의 부피유량
e.g. $(cm^3/s)/cm^2$, 즉 cm/s .

물 회수율(Water recovery): 정광으로 배출되는 기포가 운반하여 회수되는 물의 비율.

미끌림 속도(Slip velocity): 2상 사이의 상대 속도.

바이어스 속도(Bias rate): 보통 표면 속도로 표현되는 세척대를 통과하는 순 유량을 나타냄. 양(+)의 방향은 아래쪽을 향함.

운송율(Carrying rate): 기포가 광물을 흡착하여 운반가능한 비율을 나타냄.

운송능력(Carrying capacity): 기포를 생성할 수 있는 주어진 조건에서 측정된 최대 운송율을 나타냄.

세척대(클리닝존, Cleaning zone): 경계면(Interface) 상부의 기포군집층(Froth zone) - 맥석세척 및 정광회수 영역

포집대(컬렉션존, Collection zone): 기포발생장치(Sparger)부터 경계면(Interface) 사이- 광물믹싱 및 포집 영역