

# 미세공동기포를 이용한 비산재의 중금속 분리에 대한 타당성 연구

김현우\* · 오진호\*\* · 서현덕\*\*\* · 은재환\*\*\*\* · 김경천†

## Feasibility study of heavy metal separation in fly ash using microbubbles from cavitation

Hyeonwoo Kim\*, Jinho Oh\*\*, Hyunduk Seo\*\*\*, Jaehwan Eun\*\*\*\*, Kyung Chun Kim†

**Abstract** This study aims to confirm the feasibility of separating heavy metals and chlorine from fly ash generated in power plants and incinerators, enabling its potential reuse. A closed-loop Venturi system was used as the cavitation generator, applying the Bernoulli principle. Cavitation occurs when local pressure drops below the vapor pressure, and the energy released during the collapse of cavitation bubbles effectively detaches contaminants bound to the surface of the fly ash. Preliminary experiments visualizing cavitation in water confirmed the cavitation occurrence zone. After washing two types of fly ash, component analysis revealed a reduction in chlorine ions by 76-86.1% and lead by 89.5%. In additional experiments using a different fly ash sample, reductions in lead (80.7%), copper (99.5%), and hexavalent chromium (at least 63.6%) were observed. While there may be some errors due to measurement limitations, these results demonstrate the efficiency of this system in cleaning contaminated fly ash.

**Key Words** : Cavitation, Environmental pollution, Heavy metal, Physical separation, Washing venturi

### 1. 서론

비산재(Fly ash)는 소각로와 발전소의 스크러머와 같은 공기 오염 제어장치를 이용하여 걸러진 재를 의미한다. 발전소 및 소각장 비산재는 미세 입자와 배기 가스 처리를 위해 사용된

화학 물질로부터 나온 잔류물로 구성되어 있으며, 주요 성분으로는 콘크리트와 시멘트의 주 원료가 되는 탄산 칼슘이다<sup>(1)</sup>. 하지만 국내에서 발생하는 비산재 및 바닥재에는 탄산 칼슘과 함께 다량의 중금속이 함유되어 있으며<sup>(2)</sup>, 소각장 및 발전소에서 발생하는 비산재에 함유된 중금속은 소각장 내부 구조물 부식, 발전 효율 저감 등의 문제를 일으킨다. 비산재 내 탄산 칼슘 재사용을 위해 환경 규제 기준 이하로 중금속을 제거하는 과정이 필수적이다. 하지만, 현재 경제적, 기술적 한계로 비산재 내 중금속 저감 기술 개발이 미흡한 상황이며, 비산재 내 중금속 외부 용출을 방지하기 위해 시멘트 고화

† School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University, Professor  
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering, PNU, MS student

\*\* School of Mechanical Engineering, PNU, Ph.D student

\*\*\* Hanwha Aerospace Co., Ltd., Daejeon, South Korea

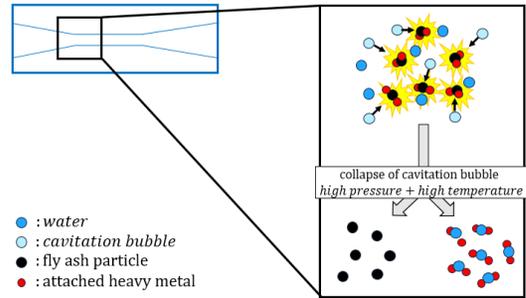
\*\*\*\* Zero Next Materials Co., Ltd., Seongnam,  
South Korea

처리 방법이 보편적으로 이용되고 있다<sup>(3)</sup>. 따라서, 환경 규제 기준을 충족하는 시멘트를 제작하기 위해 비산재에 함유된 중금속과 염소이온을 분리하여 재활용하는 방안이 요구되고 있다.

현재 개발 중인 미세 입자 내 중금속 저감 방법은 산세척, 플라즈마 블라스팅이 있다. 산을 이용해 오염 토양에서 중금속을 제거하는 산세척 방법의 경우 납에 대한 세척 효율은 35-65%로 나타났다<sup>(4)(5)</sup>. 그리고 토양 내부에 플라즈마를 주입해 오염 물질을 제거하는 플라즈마 블라스팅 방법은 50-85%의 오염 저감 효율이 측정되었다<sup>(6)</sup>. 그러나 앞서 언급한 중금속 저감 방법에는 폐기물의 다량 발생과 처리 속도 문제, 2차 오염을 야기시키는 가스 발생과 균일한 세척이 불가능하다는 점과 같은 단점이 지속적으로 언급된다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 2차 오염수를 처리하는 방법도 활발히 연구되고 있으나<sup>(7)</sup>, 추가 공정이 요구되지 않는 친환경적 중금속 저감 기술 개발이 필수적이다.

최근 이루어진 연구에서 조강희는 워싱 이젝터를 이용한 개루프 시스템으로 오염 토양 내 중금속을 저감하는 실험을 진행하였다<sup>(8)</sup>. 오염 토양 세척은 세척수가 흐르는 고압부로 저압부에 위치한 오염 토양이 유입되어 혼합물이 만들어지고, 이젝터에서 발생하는 공동의 붕괴에 의한 높은 국소적 압력 및 온도에 의해 중금속이 탈착되는 원리로 진행된다<sup>(9)(10)</sup>. 이러한 방법은 40-80%의 중금속 저감 효율을 보이며, 기존의 중금속 저감 방법과 비교하여 낮은 처리 비용이 요구되는 장점을 가진다. 하지만 개루프 시스템을 이용할 경우, 단일 처리 과정에서 비산재의 위치에 따라 공동에 노출되는 빈도가 다르기에 불균일한 처리 양상을 보일 수 있다는 단점이 있다. 또한 비산재의 초기 중금속 함량에 따라 세척이 완료되었음에도 중금속 함유량이 환경 규제 기준에 충족하지 않을 경우 앞선 전체 과정의 반복이 필요하다는 단점이 존재한다.

따라서, 본 연구는 공동현상을 이용한 비산재 내 중금속 저감을 페루프 벤추리 시스템을



**Fig. 1.** Schematic of principle to remove heavy metals in fly ash using cavitation bubbles from venturi tube

통해 확인하였으며, 벤추리에서 발생하는 공동에 의한 비산재 내 중금속 탈착을 Fig. 1과 같이 나타내었다. 세척 과정에서 발생하는 공동을 가시화하기 위해 투명 벤추리 관을 이용하였으며, 일정한 시간동안 페루프 벤추리 시스템에서 세척된 비산재의 중금속 저감 효율을 확인하였다. 본 연구를 통해 공동 현상을 이용한 처리 방법에서 발생하는 폐액 양과 사용 전력을 줄여 친환경적이고 경제적인 효과를 얻을 것으로 기대할 수 있다.

## 2. 원시료 성분 분석

본 실험을 진행하기 위해 중금속, 염소이온과 같은 오염물질을 함유한 비산재 시료가 필요하다. 이에 따라 발전소에서 한 종류, 소각장에서 두 종류의 비산재를 채집하였으며 각 비산재의 성분 분석을 진행하였고, 이를 순서대로 발전소 비산재, 소각장 A비산재, 소각장 B 비산재로 명명한다.

각 비산재에 대한 성분 분석 결과를 Table 1과 같이 정리하였다. 발전소 비산재의 경우, 납과 염소 이온이 각각 0.380 mg/L, 5,754 mg/L 검출되었으나, 소각장 A비산재의 경우 중금속은 검출되지 않았고 염소 이온이 23,324.6 mg/L 검출되었다. 소각장 B비산재의 경우, 납 1.712 mg/L, 구리 5.060 mg/L, 6가크롬 0.11 mg/L 가 검출되어, 공동현상에 의한 각 중금속에 대한 저감 효율을 성분 별로 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

**Table 1.** Results of analysis by each type of fly ash

시험결과 [발전소 비산재]			정량한계
납	mg/L	0.380	0.040
염소이온	mg/L	5754	-
시험결과 [소각장 A비산재]			정량한계
염소이온	mg/L	23324.6	-
시험결과 [소각장 B비산재]			정량한계
납	mg/L	1.712	0.040
구리	mg/L	5.060	0.006
6가크롬	mg/L	0.11	0.040

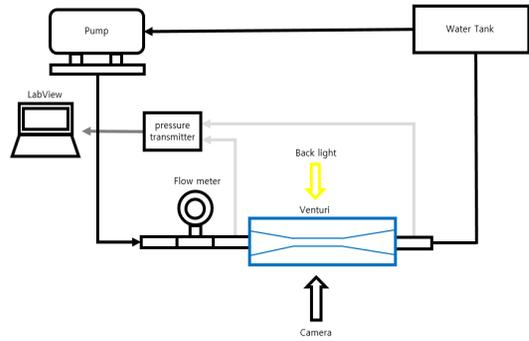
### 3. 실험 장치 및 실험 방법

#### 3.1 실험 장치

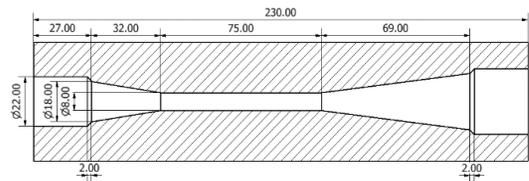
Fig. 2는 비산재의 증금속 탈착을 위한 펌프 벤추리 시스템의 개략도이며, 본 시스템의 핵심 부품인 벤추리 관의 단면도와 상세 수치는 Fig. 3과 같다. 물과 비산재의 혼합물 제작을 위해 수조를 설치했으며, 물과 혼합물의 이송을 위해 화학적 반응에 의한 발열과 공동 현상 발생량을 고려하여 내화학성 펌프 (PM-753PI, WILO)를 선정하였다. 선정한 펌프에서의 공동 현상 발생을 확인하기 위해 캐비테이션 수를 이용하여 벤추리 관을 선정하였다. 계산에 이용한 캐비테이션 수는 식 (1)과 같다.

$$C_v = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_{th}^2} \quad (1)$$

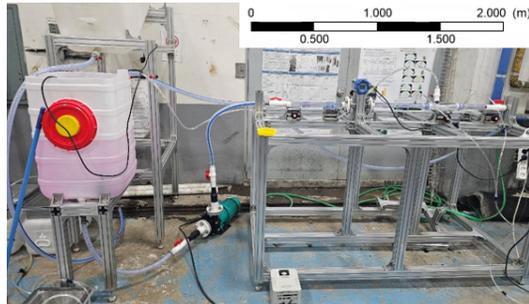
여기서,  $P_1$ 과  $P_v$ 는 각각 벤추리 목 입구에서의 압력과 물의 증기압,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $V_{th}$ 는 벤추리 목에서의 유속을 의미한다. 펌프 양수량을 기준으로 물의 온도를 20°C로 가정하여 계산한 캐비테이션 수를 통해 목 내경 12 mm 이하에서 공동이 발생하기 시작할 것으로 예상했으며, 발생한 공동의 가시화를 위해 목 내경 8 mm, 총장 230 mm의 규격을 가진 투명 벤추리 관을 선정하였다. 또한, 벤추리 관 전단에 설치한 유량계 (KTR-550-F)와 벤추리 관 전후단에 설치



**Fig. 2.** Schematic of closed-loop venturi system



**Fig. 3.** Sectional view and dimensions of venturi tube



**Fig. 4.** Constructed closed-loop venturi system

한 압력 트랜스미터 (PSG-H-C004-BCPA)를 이용하여 펌프 시스템에서의 유량과 압력을 측정하였다. 시간에 따른 압력 변화는 LabView 프로그램을 이용해 확인하였다. 이와 같은 펌프 벤추리 시스템은 Fig. 4와 같이 설치되었다.

#### 3.2 실험 방법

##### 3.2.1 물을 이용한 공동 현상 가시화

수조에 물 20 kg을 넣고 인버터의 출력을 20 Hz로 설정하여 전체 배관의 만관 상태를 유지시킨다. 이후 인버터를 60 Hz까지 5 Hz 단위로

상승시켜가며 공동의 발생을 관측하고 촬영 및 기록을 진행한다.

공동 현상의 발생을 확인하기 위해 벤추리 관 측면 150 mm의 거리에서 스마트폰의 프로 동영상 모드 UHD 60 fps로 설정 및 고정하여 후면 카메라를 이용해 촬영하였으며, 직관 형광 램프를 광원으로 사용한 Shadowgraph imaging 기법을 이용하였다<sup>(11)</sup>.

### 3.2.2 혼합물을 이용한 실험 및 가시화

수조에 물 15 kg과 비산재 5 kg을 섞고 수중 펌프를 이용해 비산재의 침전을 방지하며 교반을 진행한다. 공동 현상이 발생하지 않는 유량 조건에서 페루프 시스템 배관의 만관 상태를 유지하며 10분 동안 교반을 진행한 후, 펌프 최대 출력인 인버터 60 Hz에서 공동을 발생시키고 10분간 비산재의 세척을 진행하며 공동 가시화를 수행한다. 이 때, 공동 가시화는 물을 이용한 실험 방법과 동일하게 진행한다.

세척된 혼합물은 1-2 μm 정량 여과지에서 24 시간 동안 여과를 진행한다. 잔여 수분을 제거하기 위해 24시간 여과 과정을 거친 후 건조기를 이용하여 110°C의 온도로 2 시간동안 추가 건조한다. 건조된 비산재에 대해 오염 물질 분석을 수행하였으며, 원시료 성분 분석 결과와의 비교를 통해 페루프 벤추리 시스템의 중금속 및 염소 이온 저감 효율을 계산하였다. 추가로 높은 염소 이온 함유량을 가진 소각장 A비산재에 한하여, 물과의 교반에 의한 염소 이온 저감 효율을 추가로 확인하기 위해 동일한 고액비의 비산재 혼합물을 10분간 교반 및 건조하여 성분 분석을 진행하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 공동 현상 가시화

#### 4.1.1 물을 이용한 실험

Fig. 5와 Table 2는 각각 물을 이용한 공동 현상을 가시화 및 펌프 출력에 따른 공동현상 발

생 비교 결과이다. 펌프는 인버터 최대 출력인 60 Hz에서 유량 3.54 m<sup>3</sup>/h에 도달하며, 유량 3 m<sup>3</sup>/h, 벤추리 입출구 차압 0.6 bar 이상에서 공동 현상이 발생하기 시작하였다. 공동현상은 벤추리 관 목 영역 전반에 걸쳐 발생하며, 확관이 시작되는 지점부터 15 mm까지 유지된 후 소멸하였다. 동시에 공동현상에서 발생하는 소음과 발생 영역을 확인하여, 비산재와 물의 혼합물과 같이 공동현상 발생을 시각적으로 확인하기 어려운 환경에서 공동 발생 여부를 확인할 수 있는 기준으로 활용 가능할 것으로 예상되었다.

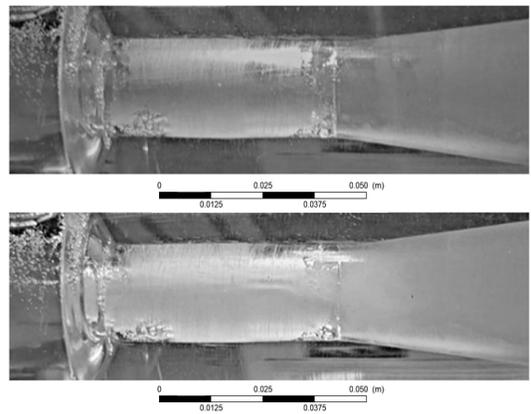


Fig. 5. (Top) No cavitation (Bottom) Cavitation

Table 2. Check table of cavitation occurrence according to flow rate

유량(m <sup>3</sup> /h)	입구 압력 (bar)	출구 압력 (bar)	공동 발생 여부
1.18	0.1	0.038	X
1.54	0.175	0.04	X
1.87	0.265	0.042	X
2.19	0.355	0.1	X
2.52	0.44	0.13	X
2.79	0.52	0.15	X
3.01	0.78	0.165	O
3.36	0.965	0.18	O
3.54	1.18	0.195	O

### 4.1.2 혼합물을 이용한 실험

물과 비산재의 혼합물에 대해 공동현상 가시화를 수행한 그림과 펌프 최대 출력에서 측정한 유량과 벤추리 관 입출구 압력을 각각 Fig. 6과 Table 3과 같이 나타내었다. 비산재에 의해 혼합물은 검은색을 띄고 있어 벤추리 목 전체에서 발생하는 공동을 확인하기에 어려움이 있었다. 하지만 공동의 발생에 의해 벤추리 목 입구에서 간헐적인 밝기 변화를 확인할 수 있었으며, 공동의 발생에 의한 소음도 동시에 확인 가능하였다. Table 3과 같이 혼합물의 종류에 따라 시스템 최대 유량과 벤추리 관 압력 손실이 다르게 나타났는데, 이는 비산재에 따른 혼합물의 점도, 밀도와 같은 특성이 달라 나타난 것으로 예상된다.

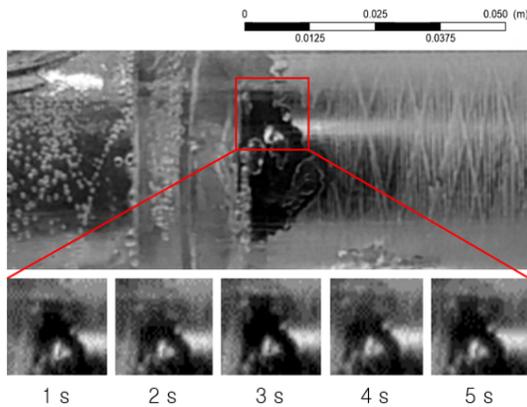


Fig. 6. Visualization for cavitation in water-fly ash mixture at venturi throat for 1-5 seconds

Table 3. Table of inlet, outlet pressure and flow rates for each case

	유량(m <sup>3</sup> /h)	입구 압력(bar)	출구 압력(bar)
발전소 비산재	2.90	1	0.15
소각장A 비산재	2.67	0.65	0.15
소각장 B비산재	2.59	0.7	0.15

### 4.2 비산재 내 중금속 저감

#### 4.2.1 염소 이온 저감 효율

Table 4는 발전소 비산재와 소각장 A비산재에 함유된 염소 이온 저감 효율을 정리한 표다. Table 4의 Basic, Mix, Processed는 각각 비산재 원시료, 물과 비산재의 교반을 진행한 시료, 공동을 이용한 세척 및 건조를 진행한 시료를 의미한다. 발전소 비산재의 경우, 최초 5,754 mg/L가 검출된 것에 반해 실험 이후 1,217.6 mg/L로 약 78.8 %의 저감 효율을 보였다. 소각장 A비산재의 경우 염소 이온이 최초 23,324.6 mg/L가 검출되었으며, 교반을 진행한 시료와 공동 실험을 진행한 시료에서 각각 5,559 mg/L, 3,249 mg/L로 확인되었다. 이는 원시료 기준 76 %, 86.1 %의 저감 효율로, 염소 이온의 높은 친수성 특징으로 물과의 교반만으로 높은 저감 효율을 보이는 것을 확인 가능하다. 또한, 공동을 이용한 세척 이후의 시료는 교반만 진행한 시료와 비교하여 약 10 % 더 높은 저감 효율을 보인다.

Table 4. Chlorine ion reduction efficiency comparison

염소 이온(mg/L)	발전소 비산재	소각장 A비산재
Basic (대조군)	5,754.0	23,324.6
Mix	-	5,559.0
Processed	1,217.6	3,249.0
저감 효율	-	76 %
	78.8 %	86.1 %

#### 4.2.2 중금속 저감 효율

Table 5, 6은 각각 발전소 비산재와 소각장 B 비산재에 함유된 중금속 저감 효율을 정리한 표다. Table 5, 6의 Basic, Mix, Processed는 각각 비산재 원시료, 물과 비산재의 교반을 진행한 시료, 공동을 이용한 세척 및 건조를 진행한 시료를 의미한다. 발전소 비산재의 경우 납이 0.380 mg/L에서 공동을 이용한 세척 실험 이후 납이 불검출 되었으므로, 정량 한계로 계산한

납의 저감 효율은 최소 89.5 %로 확인되었다. 또한 소각장 B비산재의 경우 공동 세척 실험 이후 0.331 mg/L로, 80.7 %의 납 저감 효율이 계산되었다. 구리와 6가크롬 또한 저감 효율이 각각 99.5 %, 최소 63.6 %로 계산되는데, 이는 산세척, 플라즈마 블라스팅과 같은 기존 세척 방법의 중금속 및 TPH 저감 효율보다 높은 수치다. 따라서, 페루프 벤추리 시스템을 이용한 세척 방법은 친환경적이고 경제적으로 비산재에 함유된 중금속을 효과적으로 저감할 수 있는 것을 확인하였다.

**Table 5.** Lead reduction efficiency of Power Plant Fly ash

중금속	납 (mg/L)
Basic (대조군)	0.380
Processed	불검출 (정량 한계 0.04 mg/L)
저감 효율	최소 89.5 %

**Table 6.** Heavy metals reduction efficiency of Incinerator Plant “B” Fly ash

중금속	납 (mg/L)	구리 (mg/L)	6가크롬 (mg/L)
Basic (대조군)	1.712	5.060	0.11
Processed	0.331	0.0026	불검출
저감 효율	80.7 %	99.5 %	최소 63.6 %

## 5. 결론

본 연구에서는 페루프 벤추리 시스템을 활용하여 비산재 내 중금속 및 염소 이온 제거 효율을 확인하기 위해 수리 모형 실험을 진행하였다. 미세공동 형성은 벤추리 관을 이용했으며, 형성된 미세공동 가시화를 위해 투명 벤추리 관을 사용하였다. 물을 이용한 미세공동 가시화 결과, 벤추리 목 전체 영역에서 발생하였으며, 동시에 공동에 의한 소음도 확인하였다. 하지만 혼합물을 사용할 경우, 비산재에 의한 혼합물의 불투명도에 의해 벤추리 목 전체 영역에서 발생하는 공동 가시화에 한계가 있었다. 목 입구 국소 영역에서의 가시화와 소음의

유무를 통해 다양한 혼합물에서도 공동이 발생할 수 있었다.

공동 발생에 의한 비산재 내 중금속 저감율을 계산한 결과, 납, 구리, 6가크롬 최소 저감율이 각각 80.7 %, 99.5 %, 63.6 %로 계산되었다. 이는 기존 세척 방법과 비교하여 높은 저감 효율이며, 기존 방법들의 단점을 없앤 물리적 처리 방법이기 예 효율성이 높을 것으로 기대된다. 또한 염소 이온 저감율은 최소 78.8 %로 계산되었다. 본 실험을 통해 벤추리 관을 이용한 새로운 중금속 및 염소 이온 저감 시스템 효과를 검증할 수 있으며, 지속적인 연구개발을 통해 경제적이고 친환경적인 기술로의 발전이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 원시료의 오염 물질 함유량과 페루프 벤추리 시스템의 가동 시간에 따른 저감 효율을 비교한다면 오염 물질의 종류와 함유량에 따른 시스템 가동 최적화를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. 2020R1A5A8018822, RS-2024-00345535). 추가적인 연구비는 GS건설 사내벤처팀((주)제로텍스트머터리얼즈)으로부터 지원받음.

## REFERENCE

- 1) Shim, Y. S., Kim, Y. K., Kong, S. H., Rhee, S. W., & Lee, W. K., 2003, “The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash,” Waste management, Vol. 23(9), pp.851~857.
- 2) Hong, H. M., 2005, “A Study on the Elution Characteristics of Heavy Metal in Incineration Ash by Waste Type,” Master’s thesis at Daejeon University.
- 3) Yun, J. M., T. H. Kim, and Y. S. Song., 2006 “Analysis of leaching characteristics of heavy

- metals in bottom ash," J Korean Soc Geosyst Eng., Vol. 43(6), pp.633~640.
- 4) Ko, I. W., 2004, "Remediation of soils contaminated with arsenic and heavy metals by soil washing," Journal of Soil and Groundwater Environment, Vol. 9(4), pp. 52~61.
  - 5) Lee, S. W., Lee, W. C., Lee, S. H., & Kim, S. O., 2021, "Remediation of heavy metal-contaminated soil within a military shooting range through physicochemical treatment," Journal of Soil and Groundwater Environment, Vol. 26(5), pp.9~19.
  - 6) Jang, H. S., Kim, K. J., Song, J. Y., An, S. G., & Jang, B. A., 2020, "An experimental study to improve permeability and cleaning efficiency of oil contaminated soil by plasma blasting," The Journal of Engineering Geology, Vol. 30(4), pp.557~575.
  - 7) Kurniawan, T. A., Chan, G. Y., Lo, W. H., & Babel, S., 2006, "Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals," Chemical engineering journal, Vol. 118(1-2), pp.83~98.
  - 8) Cho, K., Kim, H., Purev, O., Choi, N., & Lee, J., 2021, "Physical separation of contaminated soil using a washing ejector based on hydrodynamic cavitation," Sustainability, Vol. 14(1), pp.252.
  - 9) Li, Q., Guo, X., Ming, D. Z., Lei, M., Liu, J. L., Fang, L., & Zhang, J., 2023, "Mechanism of Microbubbles and Cavitation Effect on Bubble Breakage in a Venturi Bubble Generator," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 16(4), pp.778~793.
  - 10) Yusof, N. S. M., Anandan, S., Sivashanmugam, P., Flores, E. M., & Ashokkumar, M., 2022, "A correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry-A minireview," Ultrasonics sonochemistry, Vol. 85, 105988.
  - 11) Hwang, J., Shin, Y., & Kim, J., 2023, "Control of cavitation in Venturi using hemispherical bump," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 21(2), pp.91~101